



Lucas Geraldo de Resende Louzada

**Abordagem de Otimização para um Problema
de Roteamento e Programação de Navios**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rafael Martinelli Pinto

Rio de Janeiro
Setembro de 2019



Lucas Geraldo de Resende Louzada

**Abordagem de Otimização para um Problema
de Roteamento e Programação de Navios**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Rafael Martinelli Pinto
Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Antonio Márcio Tavares Thomé

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Orivalde Soares da Silva Júnior
Instituto Militar de Engenharia - IME

Rio de Janeiro 13 de setembro de 2019

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Lucas Geraldo de Resende Louzada

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2014. Atualmente, desempenha a função de Gerente Comercial Sênior em uma empresa de transporte marítimo internacional. Membro do Institute of Charterer Shipbrokers.

Ficha Catalográfica

Louzada, Lucas Geraldo de Resende

Abordagem de otimização para um problema de roteamento e programação de navios / Lucas Geraldo de Resende Louzada ; orientador: Rafael Martinelli Pinto. – 2019.

78 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Roteamento de navios. 3. Programação inteira mista. 4. Navios tramp. 5. Otimização. I. Pinto, Rafael Martinelli. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida e por me dar coragem nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Geralda e Lecy, pelos exemplos e ensinamentos que me foram dados.

À minha namorada e parceira desde o início dessa jornada, Ana Marcia, pelos momentos de ausência dedicados ao estudo e o fundamental apoio que não me deixou ser vencido pelo cansaço. Sem você do meu lado esse trabalho não seria possível.

Aos meus irmãos Bruno e Rodrigo, pela cumplicidade, companheirismo e estímulo.

Ao meu orientador Prof. Rafael Martinelli por todo apoio e paciência ao longo da elaboração da dissertação.

Aos Prof. Márcio Thomé e Prof. Orivalde Júnior pelas sugestões e avaliações oportunas.

Aos demais professores do curso pelo conhecimento transmitido durante os anos de mestrado.

Agradeço à empresa que compreendeu os horários de estudo e ajudou a custear o investimento na minha formação. Deixo aqui a minha gratidão aos gestores e colegas de trabalho que acompanharam de perto a realização desse trabalho e também vibraram com minha conquista.

Aos grandes amigos que estiveram presentes durante toda a trajetória e participaram dessa conquista.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização da minha pesquisa.

Resumo

Louzada, Lucas Geraldo de Resende; Martinelli Pinto, Rafael (Orientador). **Abordagem de Otimização para um Problema de Roteamento e Programação de Navios**. Rio de Janeiro, 2019. 78 p. Dissertação de Mestrado (opção profissional) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A organização da operação do transporte marítimo pode ser descrita dentre três modelos: *liner*, *industrial* ou *tramp*. No setor de *tramp*, armadores buscam otimizar os lucros através de ganhos de capacidade e redução de custos, ao mesmo tempo em que atendem às demandas e às restrições colocadas pelos clientes, muitas vezes baseadas em contratos. O roteamento de navios se torna um tema relevante dado que disponibilidade e confiabilidade de datas são um grande diferencial, ainda mais no atual contexto de alta oferta de navios *tramp* no mercado e, conseqüentemente, fretes mais baixos. Assim, o objetivo desse trabalho é apresentar um modelo de programação inteira mista visando a maximização do lucro de viagens pertencentes a uma específica rota geográfica de uma empresa *tramp*. O problema trabalhado nessa dissertação é do tipo *pick-up e delivery* (coleta e entrega) com janelas de tempo, múltiplas cargas a bordo, frota heterogênea, cargas fracionadas entre navios, velocidades de navegação variáveis e termos de tempo de trânsito garantidos. Utilizando-se da otimização *Branch-and-Bound*, o modelo é comparado com programações mensal real feita de maneira empírica por profissionais experientes dessa empresa em que o modelo matemático gera soluções com reduções de até 7% dos custos totais e desafiando paradigmas estabelecidos pelos programadores quando da realização do roteamento e programação dos navios. Tendo em vista tais resultados, o modelo se apresentou como oportunidade de implementação e melhoria do processo de programação dos navios e do nível de serviço junto aos clientes.

Palavras-chave

Roteamento de navios; programação inteira mista; navios *tramp*; otimização.

Abstract

Louzada, Lucas Geraldo de Resende; Martinelli Pinto, Rafael (Advisor). **Optimization Approach to a Ship Routing and Programming Problem.** Rio de Janeiro, 2019. 78 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The organization of the maritime transport operation can be defined among three models: liner, industrial or tramp. In the tramp sector, shipowners seek to optimize profits through capacity gains and cost savings, while meeting the demands and constraints placed by customers, often based on contracts. Vessel routing becomes as availability and reliability of dates is a great differential, especially in the current context of a high supply of tramp vessels in the market and, consequently, lower freight rates. Thus, the hereby objective is to present a mixed integer programming model aiming to maximize the profit of all voyages belonging to a specific geographical route of a tramp company. The problem solved with in this work can be defined as of pick-up and delivery with time windows, multiple cargoes on board, heterogeneous fleet, split loads, variable sailing speeds and guaranteed transit time terms. Using Branch-and-Bound optimization, the model is compared to actual monthly routing planning made empirically by experienced professionals of that company and the mathematical model generates solutions with reductions of up to 7% of total costs and challenging programmers' established paradigms when routing and programming vessels. In view of these results, the model presented itself as an opportunity to be implemented and improve the vessel routing and planning process and level of service to customers.

Keywords

Ship routing; mixed integer programming; tramp vessels; optimization.

Sumário

1. Introdução	12
1.1. Motivação	14
1.2. Objetivos e delimitação da pesquisa	16
1.3. Estrutura do trabalho	17
2 Revisão da Literatura	18
2.1. Roteamento e Programação de navios	18
3 Descrição do Problema	24
3.1. Navios <i>Break-bulk</i>	24
3.2. Problema estudado	26
3.2.1. Contrato de Afretamento de longo prazo (COA) e Spot	27
3.2.2. Fracionamento dos pedidos	29
3.2.3. Portos e rota base	31
3.2.4. Velocidade e Consumo de Combustível	34
3.2.5. Despesas Portuárias e Custos Operacionais Diários	36
3.2.6. Outras restrições: Janela de Carregamento, Tempo de Trânsito, Posição e Momento Inicial no Sistema, Capacidade dos Navios	37
3.3. Programação de Navios	40
4 Modelagem Matemática	42
4.1. Conjuntos, parâmetros e variáveis	42
4.2. O Modelo	46
5 Resultados obtidos	54
5.1. Aplicação do modelo	54
5.2. Cenários Reais	56
5.3. Análise dos resultados	57
5.3.1. Mês 01	60
5.3.2. Mês 03	61

5.3.3. Mês 02 e 04	62
6 Conclusão	64
6.1. Trabalhos futuros	65
7 Referências bibliográficas	67
Apêndice A	75

Lista de figuras

Figura 1 - Exemplo de solução com e sem divisão dos pedidos	30
Figura 2 - Mapa da rota - Brasil – Estreito de Magalhães - China	32
Figura 3 - Mapa da rota - Brasil –Canal do Panamá - China	32
Figura 4 - Mapa da rota - Brasil – Cingapura - China	33
Figura 5 - Comparação preço combustível - IFO 380 – 2019.	34
Figura 6 - Impacto das restrições de calado na capacidade dos navios	39
Figura 7 - Rotas de navios e carga	45

Lista de tabelas

Tabela 1 - Tipos e Especificação de Navios	25
Tabela 2 - Resumo Possíveis Rotas Santos – Changshu	33
Tabela 3 - Conjuntos	42
Tabela 4 - Parâmetros	43
Tabela 5 – Variáveis de decisão	43
Tabela 6 – Resumo dos meses replicados	54
Tabela 7 – Resumo dos Resultados – Modelo e Programação Real	59

Lista de siglas e abreviaturas

BIMCO	Baltic and International Maritime Council
COA	Contrato de Afretamento / <i>Contract of Affreightment</i>
DWT	Porte bruto / <i>Deadweight</i>
FIO	<i>Free In and Out</i>
M.N.	Milhas-náuticas
UNCTAD	Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento

1. Introdução

A Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD), em seu relatório anual de 2018 sobre transporte marítimo, define que 80% do comércio global de cargas, em volume, é realizado através do transporte marítimo, o qual, em 2017, contabilizou 10,7 bilhões de toneladas. Além disso, praticamente dois terços desse volume movimentado em águas se dá entre países em desenvolvimento. Assim, o relatório aponta que, em sendo o transporte marítimo uma parte considerável do movimento global de materiais, a frota global de navios e suas indústrias podem ser consideradas a espinha dorsal dessa indústria.

Nesse contexto, o relatório da UNCTAD mostra que 29,9% do volume de carga movimentado através do transporte marítimo foi de carga a granel/seca. Desta, carvão, minério de ferro e grãos contabilizaram 42,3%, estimados em 7,6 bilhões de toneladas em 2017. O restante foi de granéis containerizados, granéis “menores” e carga *Break-bulk*.

A UNCTAD apresenta que o mercado de transporte marítimo é bastante volátil e diretamente afetado por quaisquer mudanças de cunho geopolítico, econômico, de políticas de comércio exterior ou mudanças estruturais, que podem levar a quedas de rendimento e lucratividade (UNCTAD, 2018). Nesse contexto, o setor marítimo vem sofrendo com os fretes baixos causados pelo desbalanceamento entre oferta e demanda de navios, bem como pelo baixo crescimento econômico global. Quando tais fretes baixos associados a preços de combustíveis altos (principal custo de um navio) e a condições exógenas às organizações acima descritas, cabe ao operador de navios buscar estratégias para otimizar seus ganhos, a exemplo, o “*slow-steaming*” onde se reduz a velocidade dos navios para economizar em combustível (Vilhelmsen *et al.*, 2015).

Lawrence (1972) define em três as maneiras pelas quais as operações de transporte marítimo podem ser realizadas, que são: *liner*, *industrial* e *tramp*. Christiansen *et al.* (2004), detalham as três operações, a começar pelos *liners*, usualmente navios contêineres, caracterizados por seguirem um itinerário e um

cronograma publicados, conforme uma linha de ônibus, e os embarcadores dependem dos dias e horários para utilizá-lo. O segundo tipo, o *industrial*, dá-se quando os embarcadores controlam o transporte marítimo ou por meio de frota própria ou por navio afretado por curto período para fazer o transporte do seu produto. Usualmente são empresas altamente verticalizadas de setores como os de petróleo, químicos e minérios. Devido ao grande volume transportado buscam, a partir desse modelo operacional, mitigar custos por meio de economias de escala.

Por fim, Christiansen *et al.* (2004) explicam que os navios *tramp* são aqueles que seguem a disponibilidade de carga, à semelhança de um táxi. Se por um lado esse modelo se beneficia quando há aumento da demanda de transporte, de igual maneira tem grande exposição no cenário contrário. Por isso muitas vezes são firmados contratos de afretamento com alguns embarcadores para transporte de quantidades específicas entre determinados portos dentro de um prazo estabelecido. Nesse caso, o frete é pago sob unidade de carga transportada e, como os *liners*, busca maximizar o lucro por unidade de tempo. Ou seja, quanto mais rápido, mais se fatura naquele período.

Fagerholt (2004) ressalta o impacto da programação de navios nos custos operacionais dos armadores, função esta exercida por profissionais com grande experiência no setor. O trabalho de Christiansen *et al.* (2004) trata das etapas de programação e roteamento, consideradas táticas (com grande impacto estratégico), as quais vêm sendo cada vez mais estudadas, antigamente com mais ênfase para modelo *industrial* e, mais recentemente, para o tipo *tramp*. Entre as motivações de tal mudança de foco do estudo estão o maior interesse dos grandes embarcadores em sua atividade fim, abrindo mão da navegação para armadores independentes e a consolidação das empresas que trabalham nesse modelo (Rowbotham, 2014).

Conforme apresentado por Diz (2012), os estudos de roteamento de navios são uma constante na literatura acadêmica, tendo em Flodd (1954) um dos pioneiros quando aplicado a navios de guerra. Christiansen *et al.* (2013), em revisão bibliográfica do tema, destacam que através dos anos aumentou-se cada vez mais o volume de estudos sobre tema (o qual praticamente dobrou a cada década desde 1992), combinado com mudanças nos enfoques e na utilização de ferramental para resolução. Os autores destacam o maior foco em problemas teóricos do que em casos reais nos artigos mais recentes relacionados o roteamento e programação de navios.

Psaraftis, importante autor na área de roteamento, com trabalhos de problema dial-a-ride (1980), em seu escrito de 2017 explica que nos primeiros trabalhos de roteamento de navios a grande maioria das pesquisas teve origem a partir de problemas reais de operações marítimas, enquanto os trabalhos científicos mais recentes estão focados, principalmente, em modelos teóricos e menos pautados em operações reais. Psaraftis (2017) destaca, dentre a exploração das possíveis causas de tal mudança do real para o teórico, o maior envolvimento de profissionais do setor que podem contribuir com olhar crítico para a estrutura e a conclusão dos trabalhos, como é o caso dessa dissertação, desenvolvida conjuntamente entre o acadêmico e o profissional. O autor destaca a importância dos trabalhos sobre roteamento e programação de navios e sugere que os futuros trabalhos desenvolvidos foquem mais na modelagem/formulação do problema, em detalhes críticos à realidade do setor de transporte marítimo e menos na fase metodológica do problema de otimização.

1.1. Motivação

Visto o cenário altamente competitivo que o mercado de navios *tramp* enfrenta, no qual os fretes são extremamente voláteis e buscam evitar o aumento de frota – seja por questões financeiras da organização, seja para manter o mercado balanceado - a empresa estudada decidiu investir em diversas frentes para otimizar a utilização de seus ativos, manter/melhorar o nível de serviço para os seus clientes, além de aumentar a flexibilidade para fechamento de cargas *spot*, que são consideradas aquelas cargas esporádicas, sem frequência regular, para um embarque praticamente imediato, a qual é regulada muitas vezes por um contrato destinado somente a um embarque específico (Yu *et al.*, 2017).

O caso estudado nessa dissertação refere-se à abordagem de otimização e roteamento de navios que operam no modelo *tramp*. Especificamente, do transporte de carga fracionada como celulose, blocos de granitos, suco congelado, granel em menor lote (8.000-10.000 toneladas), o qual é usualmente denominado de “*Break-bulk*”. A empresa em estudo trabalha com uma frota do tipo “*open-hatch box shaped*”, que são navios que carregam o próprio guindaste necessário à operação

de carregamento e descarga, bem como possui porões com a base retangular e o guindaste capaz de acessar todos os cantos do porão.

No entanto, a frota de estudo é heterogênea e com diferentes capacidades (DWT variando entre 40.000 t e 70.000 t). São diversas produtividades por portos, custos portuários, custos diários, velocidade de navegação e consumo de combustível. Os navios transportam distintas *commodities* dentro do nicho *Break-bulk* conforme acima mencionado, para diferentes embarcadores que carregam múltiplos pedidos movimentados de diferentes portos, tanto no carregamento quanto na descarga. Soma-se a este problema o fato de que a relação com cada cliente deve ser regida por contratos distintos e com diferentes cláusulas de janela de tempo para chegada no porto de carregamento e tempo de trânsito entre os portos de carga e descarga de cada pedido.

Atualmente, a programação dos navios é feita de forma empírica por experientes profissionais que conhecem detalhes dos clientes, portos, contratos, cargas e navios. De forma centralizada, os navios são alocados para cada linha por todo o globo, como exemplo Brasil-Ásia; Brasil-Mediterrâneo, Norte Europa-Ásia; etc. Cada linha tem o seu responsável comercial, aqui chamado de programador, que manualmente roteiriza os navios e aloca as cargas respeitando as inúmeras restrições existentes (janela de carregamento, tempo de trânsito até porto de destino, capacidade da embarcação, etc.). Potencialmente, cada profissional, manualmente, cria cenários a fim de comparar possíveis rotações e seus impactos, limitado a poucos indicadores e em sua maioria relacionados a atendimento. Como é um serviço de cargas fracionadas composto por vários portos de descarga e embarcadores numa mesma viagem, a todo atraso ou incerteza em algum porto, muitas vezes por questões climáticas - uma vez que algumas cargas não podem ser operadas sob tais condições - o programador tem que revisar a rotação dos demais portos de forma contínua, bem como tomar as ações comerciais necessárias para continuar atendendo as datas acordadas.

Toda essa complexidade para o roteamento e programação dos navios, torna-se ainda maior, dado que é um setor de grandes números, bem como dezenas de milhares de toneladas em cada embarque e custos em milhões de dólares por viagem. Com isso, realizar esse processo de otimização de maneira manual, feito em planilhas, de forma empírica, mesmo que com vasta bagagem dos programadores, mostra-se um modo bastante defasado e antiquado para lidar com

as complexidades das restrições e, ao mesmo tempo, da constante demanda para respostas rápidas pelos clientes, sem que haja perdas financeiras para o armador.

1.2. Objetivos e delimitação da pesquisa

O objetivo desse trabalho é desenvolver uma ferramenta de suporte à decisão focada na redução de custos e no alto nível de atendimento. Com tal ferramental, o usuário pode atualizar diferentes informações como pedidos, portos, quantidade de carga, capacidade dos navios, restrições contratuais, de forma que o modelo computacional seja capaz de gerar soluções ótimas de roteamento. Os resultados, então, são devidamente analisados pelos respectivos programadores e validados para sua posterior efetivação junto aos clientes.

Destaca-se que, com o ferramental desenvolvido nessa pesquisa, a figura do programador permanece sendo de fundamental importância, tendo em vista seu vasto arcabouço de conhecimento, o que torna o seu trabalho e conhecimento indispensáveis. As rotas geradas pelo modelo têm uma relação simbiótica com o programador, uma vez que o modelo o guia para as melhores soluções, da mesma maneira que o programador avalia e incrementa o modelo para resultados mais realistas.

O modelo desenvolvido serve para a otimização do planejamento mensal de uma frota que atende a linha Brasil-Ásia, inserida em uma empresa de transporte marítimo que opera no modelo *tramp*. A fim de que tal modelo seja validado, ele é comparado com programações reais e seus respectivos resultados são apresentados sob a perspectiva de indicadores como: custo total, capacidade ocupada dos navios, tempo total de navios alocados na rota, consumo total de combustível, número de chamadas portuárias.

Para alcançar o objetivo geral acima apresentado, foram considerados os seguintes objetivos específicos:

- Levantar as restrições de capacidade, portos, contratuais (janela de chegada nos portos de carregamento e tempo de trânsito);
- Organizar a base de dados para pedidos, navios, distâncias e restrições de dados reais e os respectivos resultados mensais;
- Utilizar da linguagem de programação Julia para implementação do modelo matemático e gerar as soluções ótimas que minimizam o custo total.

- Comparar, analisar e validar as roteirizações geradas pelo modelo.

1.3.

Estrutura do trabalho

Este trabalho é estruturado em cinco capítulos, incluindo a introdução. O Capítulo 2 apresenta uma revisão de literatura sobre o tema de roteamento e programação de navios para navios *tramp*. O Capítulo 3 descreve o problema a ser estudado no trabalho. O Capítulo 4 detalha o modelo matemático da programação linear inteira mista. O Capítulo 5 apresenta os resultados da aplicação do modelo, comparado a dados reais, bem como sua análise. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho.

2 Revisão da Literatura

O presente capítulo examina as publicações relacionados a problemas de roteamento e programação de navios *tramp*, bem como a utilização de métodos exatos para sua resolução e os casos em que são aplicados.

2.1. Roteamento e Programação de navios

Em linha ao objetivo deste trabalho, a revisão de literatura é focada em modelos de roteamento e programação para navios *tramp*, excluindo, assim, os trabalhos dos demais tipos.

Al-Khayyal e Hwang (2007) definem que problemas de roteamento de carga são, em sua maioria, restritivos pelas condições da carga, seja devido às circunstâncias dos portos (restrição de capacidade, produtividade da operação associada ao navio) seja pelas janelas de chegada e tempo de trânsito da carga até o destino. Christiansen *et al.* (2013) definem a programação quando há um aspecto temporal no roteamento, ou seja, quando os tempos de vários eventos da viagem são incluídos no roteamento do navio. Os autores entendem que problemas de roteamento e programação de navios são de grande importância para o transporte marítimo *tramp* e *industrial*.

Christiansen e Fergeholt (2013) explicam que uma carga consiste em uma quantidade individualizada de produtos que são coletados em um porto específico, transportados e descarregados em um determinado porto de entrega. Usualmente se tem uma janela de chegada no porto de carregamento (coleta), e potencialmente pode-se ter uma janela na descarga. O operador controla uma frota heterogênea de navios que estão disponíveis para o transporte de carga. No entanto, são inúmeros os motivos que impedem os navios de serem compatíveis com certas cargas. Os autores nomeiam, por exemplo, a restrição de calado nos portos requisitados. Usualmente, as capacidades dos navios e a quantidade de carga a ser transportada no horizonte de tempo estabelecido permitem que os navios consigam carregar

múltiplas cargas na mesma viagem. Para grandes cargas granéis, como grãos e minério de ferro, por exemplo, é usual embarques em que, em um único porto, carrega-se todo o navio para um único embarcador. Enquanto que para granéis menores e líquidos, nos quais a quantidade afretada é menor que a capacidade de um navio, a capacidade da embarcação pode acomodar várias cargas simultaneamente.

Christiansen *et al.* (2015) explicam que a principal diferença entre os problemas do tipo *industrial* e *tramp* consiste na formulação da função objetivo. No primeiro o objetivo é redução de custos, uma vez que esse é o dono da carga transportada e toda operação de movimentação do produto da origem ao destino é vista como custo. Já os problemas de roteamento *tramp* são usualmente do tipo maximização, dada a receita das cargas e os custos para atendimento, baseados no atendimento de um conjunto de cargas obrigatórias, ao mesmo tempo em que busca otimizar o retorno com potenciais cargas *spot*. As cargas obrigatórias são fruto de acordos de longo prazo entre armador e afretador (donos das cargas).

Vilhelmsen *et al.* (2014) entendem que os problemas de roteamento e programação de navios *tramp* são fortemente relacionados com o Problema de Roteamento de Veículos, seja na modelagem do problema e seus métodos de resolução, seja nas constantes referências entre artigos dos dois tipos de problema. No entanto, os autores detalham alguns pontos específicos do transporte marítimo do tipo *tramp* em comparação com os problemas de roteamento de veículos, que são:

- Operação contínua: Ao contrário dos caminhões, os navios operam todos os dias e horários. Isso quer dizer que a programação de navios usualmente não tem momentos de ociosidade para absorver quaisquer atrasos. Nesse sentido, os navios têm variação quanto à posição e tempos iniciais no modelo, o que é dependente da alocação de rota anterior que o navio realizava, enquanto caminhões, por exemplo, podem ter o desenho de todos iniciados no mesmo depósito pela manhã e se recolherem ao final do dia para a mesma base.

- Não há um depósito comum: navios não tem que retornar para o ponto inicial, principalmente navios *tramp*, que seguem as oportunidades do mercado. Mesmo com problemas de roteamento e programação de veículos com múltiplos depósitos, os caminhões retornam para algum desses ao final da rota.

- Problemas de compatibilidade: ao transporte marítimo internacional, principalmente quando há carga tipo *Break-bulk*, que tem diferentes formatos e restrições para transporte, soma-se as questões de calado, comprimento e largura das embarcações, que impedem a possibilidade de transporte de dado material. Assim, os autores indicam que tais pontos podem afetar/restringir a quantidade de carga a bordo.

- Cargas opcionais: principalmente no modelo *tramp*, o objetivo é a maximização dos lucros ao carregar cargas *spot*, ao mesmo tempo em que acomoda as cargas de contrato e suas penalizações. No modelo tradicional de problema de roteamento de veículos, busca-se o atendimento de todos os clientes a um custo mínimo.

O trabalho de Al-Khayyal e Hwang (2007) destaca que a Pesquisa Operacional há bastante tempo trabalha com a temática de roteamento e programação de veículos para atender a demanda de inúmeros clientes dispersos no mapa, sendo que tais soluções e algoritmos proporcionaram enormes melhorias para a indústria de transporte terrestre. No entanto, os autores chamam atenção para o fato de que, apesar de 90% de todo volume e 70% do valor de todos os bens transportados por todo globo serem via transporte marítimo, os desenvolvimentos de pesquisa em roteamento e programação nesse escopo surgiram mais tarde do que para veículos terrestres.

Conforme já apresentado, existem três tipos básicos para operações em transporte marítimo, sendo: *liner*, *tramp* e *industrial*. Vilhelmsen *et al.* (2014) entendem que para problemas de roteamento e programação há grande proximidade com as pesquisas sobre *tramp* e *industrial*. A literatura acadêmica sobre tais temas data desde a década de 1950, conforme apresentado em quatro revisões bibliográficas sobre roteamento de navios, uma a cada década, sendo Ronen (1983), Ronen (1993), Christiansen *et al.* (2004) e Christiansen *et al.* (2013). Como referência, o primeiro trabalho apresenta somente duas referências a estudos com modelo *tramp*; o segundo, nenhum; o terceiro, cinco novas referências, em sua maioria híbridos de *tramp* e *industrial* e, por último, o quarto com aproximadamente trinta trabalhos.

Na perspectiva histórica, Flood (1954) é considerado um dos primeiros trabalhos de roteamento de navios, baseado na premissa de uma frota militar homogênea transportando combustível. Devido à homogeneidade, o autor

considera que todos os navios têm os mesmos custos operacionais e portuários e que as viagens de lastro para reposicionamento devem ser o foco para redução de custos. Partindo do método Simplex, a pesquisa foca na redução da distância percorrida para reposicionamento da embarcação vazia.

Appelgren (1969) é outro autor pioneiro de trabalhos sobre roteamento e programação de navios do tipo *tramp*, nos quais se utilizou de decomposição Dantzig-Wolfe, método pioneiro para otimização de navios (Gronhaug *et al.*, 2010). A geração de colunas se tornou um dos principais métodos de resolução para problemas maiores (Diz, 2012). No trabalho de 1971, Appelgren revisou a formulação inicial a fim de poder se utilizar do método *Branch-and-Bound* para achar soluções inteiras para problemas relativamente grandes. Baseando-se nas pesquisas de roteamento de veículos da época, Ronen (1986) estuda o modelo de frota heterogênea com diferentes capacidades de carga a bordo e com diferentes custos operacionais e restrições, em que cada navio sai e regressa para o mesmo terminal, tendo distribuído seus produtos em diversos destinos.

O trabalho de Brown *et al.* (1987) se destaca com a utilização de janelas de tempo e de velocidade como variáveis de decisão do problema em uma frota de navios de petróleo bruto. Partindo de um problema de partição, um algoritmo, inicialmente, gera roteiros viáveis e, posteriormente, um algoritmo de otimização trabalha os problemas separados. Tal trabalho serviu de referência para a utilização da velocidade como variável de decisão (Gatica e Miranda, 2011; Fagerholt *et al.*, 2010; Norstad *et al.*, 2010; Wen *et al.*, 2016).

Fagerholt e Christiansen (2000) utilizaram um algoritmo de programação dinâmica para resolver um problema de caixeiro viajante com aplicação no roteamento de navios. Os problemas de *pick-up* e *delivery* (coleta e entrega) com janelas de chegada no porto de carregamento com fracionamento de pedidos em mais de um navio foram estudados por Andersson *et al.* (2011), que propuseram uma metodologia de inicialmente gerar rotas através de método exato, posteriormente, utilizados em dois modelos de fluxo de rede. Na mesma temática de embarques fracionados, Stålhane *et al.* (2012) utilizaram do algoritmo *Branch-and-Cut* para resolução. Vilhelmsen *et al.* (2014) trabalham com geração de colunas para resolver problemas de embarques cheios (uma carga a bordo), com integração a otimização de abastecimento de combustível.

Homsí *et al.* (2019) destacam que heurísticas e metaheurísticas foram aplicadas de diferentes maneiras ao longo dos trabalhos realizados em roteamento e programação de navios. Os autores então destacam os seguintes trabalhos: multi-start LS de Bronmo *et al.* (2007); busca tabu unificadas de Korsvik *et al.* (2009); busca na vizinhança de grande porte de Korsvik *et al.* (2011) e Hemmati *et al.* (2014); algoritmo de busca genética híbrida de Borthen *et al.* (2017). Homsí *et al.* (2019), utilizam de busca genética híbrida e *Branch, cut and price* para resolução do problema por eles estudados.

Quanto a pesquisas aplicadas, alguns exemplos são o trabalho de Ye *et al.* (2017) que se basearam numa base oferecida por uma empresa de petróleo referente ao período de um mês a partir do qual o trabalho foi aplicado e validado. Em outro extremo, Bronmo *et al.* (2007) aplicam em oito problemas reais de planejamento em quatro empresas de navegação distintas. No entanto, todos os trabalhos apresentam o estudo computacional com a utilização de dados criados, a exemplo das instâncias de testes proposto por Stalhane *et al.* (2014). Trottier e Cordeau (2019) que se utilizam de busca tabu, inspirados no trabalho de Cordeau e Laporte (2003), com semelhante problema de *dial-a-ride*, aplicado a uma empresa de cabotagem canadense.

Diversos trabalhos estudam o roteamento e programação de navios para tipos de carga dentro do setor *tramp*, apesar de nenhum ser relacionado a *Break-Bulk*. Como referência de estudos utilizando produtos usualmente com operação *tramp* estão os embarques de carga de projeto (Andersson *et al.*, 2011) e até mesmo de carros (Kang *et al.*, 2012). Uma referência destacada estão trabalhos que trabalham em mais elos da cadeia de suprimentos (Stalhane *et al.*, 2014; Hemmati *et al.*, 2015), além do armador ou afretador.

Em relação a softwares utilizados na literatura para resolução de problema de roteamento e programação de navios *tramp*, Diz (2012) recapitula diferentes opções que usualmente utilizam de *Branch-and-Bound* para resolução, bem como outros métodos. Brown *et al.* (1987) e Braush *et al.* (1998), utilizam do sistema X-System que utiliza da verificação das operações primal e dual até encontrar uma programação viável por navio que garanta o transporte de toda a carga. Kim e Lee (1977), por exemplo, utilizaram do software LINDO para resolução. Christiansen e Fagerholt (2002) utilizaram *Borland Pascal 7.0*, utilizando para implementação o *GAMS/CPLEX versão 5.0*. Furman *et al.* (2011) utilizaram de Microsoft Excel

como interface e AIMMS, como plataforma de modelagem, e CPLEX para resolução. Da revisão bibliográfica para otimização de navios *tramp*, não foi encontrado nenhum artigo que utiliza da linguagem de programação Julia.

Oneil (2018), utiliza-se do software Gurobi para resolução de um problema de programação linear mista para o roteamento de veículos com *pick-up* e *delivery* (coleta e entrega) e restrição de janela.

Especificamente para os fins dessa dissertação é utilizado um método exato denominado *Branch-and-Bound* (B&B). Beltramin (2015) explica que esse é um algoritmo de otimização genérico baseado na enumeração inteligente para chegar na solução ótima para qualquer problema de otimização combinatória. Baseia-se na estratégia de dividir-e-conquistar para repartir os espaços de busca do problema em subproblemas, criando uma rede de busca. Cada nó dessa árvore constitui um problema específico de programação linear inteira mista, com restrições de limite das variáveis inteiras. O algoritmo resolve o relaxamento linear em cada nó, fazendo com que seja resolvido cada subproblema com todas as suas variáveis como contínuas.

O trabalho de Wen *et al.* (2014), analisando sua utilização em um problema de embarques de navio com um único embarcador a bordo e velocidade variável, demonstra que, quando comparado a uma metaheurística genética com o uso de CPLEX 12.5 - software comercial que utiliza de métodos exatos - mostra que para problemas com utilização de velocidade variável, com até 20 navios, 40 cargas e horizonte de planejamento de 30 dias, a solução exata e a da heurística são encontradas com uma pequena diferença no tempo de processamento, no caso 0,2 segundos no primeiro e 3 segundos para o exato. Quanto maior o problema, maior a discrepância do tempo de processamento. O trabalho de Wen *et al.* (2014) é um exemplo de que heurística e método exato para problema considerados “pequenos” são igualmente eficientes no tempo de resposta da solução.

Baseado na revisão de literatura, a pesquisa em otimização do roteamento e programação de navios *tramp* vem cada vez mais progredindo. Em diferentes trabalhos são exploradas diversas temáticas como frota heterogênea, janelas para chegada no porto de carregamento, *pick-up* e *delivery*, tempo de trânsito e restrições de capacidade. No entanto, nenhum trabalho se apresentou englobando todas essas temáticas aplicadas ao setor *tramp*, buscando um caso real e utilizando de método exato para resolução.

3 Descrição do Problema

Nesta seção é detalhada toda a problemática de roteamento e programação dos navios. Inicialmente, detalha-se o nicho e o modelo de operação em que a empresa se encontra. Após, são discutidos os detalhes da rota objeto de estudo, que se refere aos navios que carregam no Brasil e seguem para a Ásia e as principais restrições para a otimização.

3.1. Navios *Break-bulk*

Segundo Homayouni *et al.*(2018), a carga granel pode ser dividida em quatro grupos: carga granéis sólida (exemplo: grãos, areia, carvão, minério, etc.), carga líquida (exemplo: petróleo bruto, GNL, combustíveis líquidos, produtos químicos, óleo vegetal, etc.), outras cargas granéis e *Break-bulk*, sendo esta última baseada nas *commodities* carregadas pelos navios desse trabalho.

Segundo Cosar e Demir (2018), *Break-bulk* pode ser definido como o transporte de bens em sacos (*bags*), fardos, embalados em caixas ou paletes no porão dos navios, em vez de em contêineres padronizados. Com isso, as cargas do tipo *Break-bulk* devem ser manuseadas individualmente, o que geralmente é feito por um guindaste instalado no próprio navio ou no cais. A maior parte da operação é pouco automatizada e, conseqüentemente, altamente demandante de mão-de-obra, o que é a principal razão dos grandes custos associados ao transporte desse tipo de carga.

Rowbotham (2014) destaca a grande competição existente entre navios especializados de *Break-bulk* com navios de contêiner. O autor destaca que o modelo *Break-bulk* data dos tempos bíblicos como a única maneira de transporte de carga, conforme escrito no poema “Cargoes” de John Masefield (1903). Quando da introdução dos contêineres na década de 1950 e sua rápida expansão, o mercado *Break-bulk* foi inicialmente bastante impactado. No entanto, nos últimos anos,

vislumbrou-se um renascimento ao explorar nichos do transporte marítimo internacional.

Conforme Rowbotham (2014) explica, as cargas de *Break-bulk* são capazes de capturar produtos que não cabem nos contêineres (transportados em *liners*) muitas vezes pelo volume e pelo peso da carga. Os grandes navios graneleiros muitas vezes não conseguem transportar cargas do tipo *Break-bulk* devido ao formato dos porões, que podem gerar risco para integridade da carga, ou operações demoradas com alto custo de material e pessoal. Assim, os navios de *Break-bulk* são usualmente do tipo *Handysize* ou *Handymax/Supramax*, tendo suas especificações conforme a Tabela 1:

Tabela 1 - Tipos e Especificação de Navios

Tipo	Porte Bruto (DWT)	Calado (m)	Comprimento (m)	Largura (m)	Guindaste a bordo?	Número médio de porões
Capesize	100,000 - 400,000	17.95	289	45	Nao	9
Panamax	60,000 - 100,000	14.1	225	32.26	Nao	7
Handymax/Supramax	40,000 - 65,000	12.2	199	32.2	Sim	5
Handysize	20,000 - 40,000	10.2	179.9	28.4	Sim	5

Fonte: Adaptado de OpenSea (2019).

Uma grande variedade de produtos é transportada em navios de *Break-bulk*, tais como: componentes industriais, fábricas, pequenas embarcações, pás e turbinas eólicas, maquinário, vagões e locomotivas, bem como madeira, fardos de celulose, blocos de granito, bobinas de papel, lingotes de alumínio, produtos siderúrgicos, concentrados, tubulação de aço, fertilizantes, dentre outros.

À medida que o mercado de carga *Break-bulk* se desenvolveu, o modelo operacional permaneceu sendo do tipo *tramp*, mesmo que numa escala global. Isso aconteceu devido à maior globalização do comércio exterior, bem como devido à melhoria dos portos e navios para atenderem a uma grande variedade de cargas, operados por profissionais e equipamentos altamente especializados e qualificados.

Nesse sentido, as operações de carga *Break-bulk* exigem um grande número de recursos quando se trata do navio atracado. São estivadores, operadores de guindaste, caminhões e armazéns que, de alguma maneira, encarecem as operações portuárias e o frete, quando comparados com grandes graneleiros ou contêineres. No entanto, Rowbotham (2014) mostra que quando se compara os custos logísticos, os embarques de carga *Break-bulk* podem ser mais atrativos do que os contêineres, uma vez que estes têm custos de desmontagem, estufagem e expedição além das

diárias dos contêineres e custos com a descarga de caminhões nos pátios antes do embarque. Para algumas cargas *Break-bulk*, o autor indica que é possível descarregar a carga do navio diretamente para o caminhão e seguir direto para a fábrica, sem passar por armazenagem intermediária, o que reduz os custos logísticos.

Homayouni et (2018) descrevem que navios especializados de *Break-bulk* representam aproximadamente 4% de todo porte bruto da frota global. Rowbotham (2014) recapitula que em 2012 eram 2.150 navios de tal tipo em serviço.

3.2. Problema estudado

O problema estudado é aplicado a uma empresa especializada no transporte de cargas do tipo *Break-bulk* com navios do tipo “*open hatch box shaped*”, contendo uma frota permanente de mais de 90 navios, dentre os tipos Handysize, Handymax/Supramax, Ultramax e Panamax. A empresa atua com rotas por todo o globo, transportando os inúmeros tipos de produtos aptos para tais tipos de navios, variando entre cargas de contrato e *spot*. Especificamente, foi escolhida a rota dos navios que carregam na costa leste da América do Sul com destino para os portos na Ásia, especificamente China, Coréia do Sul e Japão.

Tal seleção foi devido à grande importância dessa rota para navios de “*Break-bulk*” e, naturalmente, para a empresa estudada. Bem como, é uma linha que atua com regularidade e com um grande número de navios alocados todos os meses, trazendo o volume e a complexidade necessários para explorar a atividade de roteamento e programação de navios que geram grande impacto à organização.

Em linha com o trabalho de Christianssen *et al.* (2007), a atividade de roteamento e programação de navios é tratada dentro da organização estudada no nível tático, com foco em decisões de médio prazo (30 a 90 dias). O planejamento visa a maximização dos lucros, fortemente relacionado à redução de custos e ao mesmo tempo com um alto nível de atendimento dos termos acordados com os clientes.

O problema aqui estudado é do tipo *tramp*, uma vez que o proprietário da frota e tomador de decisão sobre a alocação das embarcações (organização estudada) não detém nenhuma das cargas transportadas, limitando sua atuação

somente ao transporte marítimo internacional. Rowbotham (2014) e Plomaritou e Papadopoulou (2018) definem que esse método conforme o frete é denominado FIOS (*free in and out*), no qual o afretador é responsável por providenciar caminhões com carga ao largo do navio, bem como a estiva para carregar o navio dentro do porão, com todo o material de amarração e segurança da carga. Além disso, o afretador é responsável por qualquer avaria causada à carga durante a operação, seja no carregamento, seja na descarga. A função então do armador é de transporte do produto entre os portos solicitados garantindo que a todo tempo o navio esteja em ordem para entregar a carga a bordo no destino com a mesma qualidade e integridade que do carregamento. Além disso, pela característica do parcelamento das cargas, não há uma rota fixa e regular que se repete para atendimento dos produtos, como é o caso dos navios *liner*.

3.2.1.

Contrato de Afretamento de longo prazo (COA) e Spot

Em linha com o apresentado por Christiansen *et al.* (2004), a empresa em estudo trabalha basicamente com dois mecanismos para comercialização do espaço dos navios: através de Contratos de Afretamento de longo prazo (COA – *Contract of Affreightment*) ou *spots* (único ou poucos embarques em curto horizonte de tempo). Os primeiros, conforme o nome indica, são firmados entre armador e embarcador/afretador para transporte de volumes durante um período maior de tempo (um ano em média, mas alguns casos de até mais de dez anos) e com regularidade e lotes mínimos mensais/anuais definidos em contrato. Já a comercialização do modelo *spot* é para volumes e frequência de embarques menores, conforme as oportunidades de mercado surgem.

Do ponto de vista do roteamento e programação de navios, as cargas de contrato (COA) tem definido nos seus termos todo o processo de planejamento de carga que envolvem declarações e prazos, em que o não cumprimento por alguma das partes é passível de punição. Quanto às cargas *spot*, podem ser analisadas a partir do seu fechamento perante o horizonte de programação dos navios. Caso o fechamento ocorra antes do início do horizonte de alocação dos navios para as respectivas rotas, pode-se entender que são cargas altamente estratégicas que são

fechadas para a manutenção/expansão da participação no mercado pelo armador ou para atrasar os navios, evitando a ociosidade da embarcação até o início da janela de atendimento nos portos seguintes. Nesse caso, essas cargas são fechadas com base em um cálculo de contribuição para uma viagem genérica na rota e com a devida antecedência, assim sendo tratadas para o modelo de roteamento no mesmo perfil das cargas de contrato (COA).

A avaliação e fechamento de cargas *spot* pode ocorrer durante o horizonte de análise da programação dos navios e serve como possibilidade pontual para otimizar o resultado financeiro ao aproveitar a oportunidade de mercado. Conclui-se, assim, que os volumes de contrato (COA) tem a obrigatoriedade de serem realizados, evitando as respectivas compensações contratuais por mau desempenho, além de transmitir uma imagem de confiabilidade para todo o mercado. Assim, as cargas *spot* surgem como oportunidades pontuais para alavancar o lucro e/ou aumentar a presença de mercado do armador.

Operacionalmente, para os Contratos de Afretamento (COA), os clientes informam em meados do mês anterior ao horizonte de realização dos embarques o volume esperado para cada destino para os três meses seguintes (horizonte de 90 dias). No entanto, apenas os volumes declarados para o mês seguinte (horizonte de 30 a 40 dias) que o embarcador será obrigado a realizar, enquanto os demais dois meses servem como orientação. Tal processo é aqui denominado “declaração de volume”, em que os embarcadores especificam as quantidades a serem carregadas em cada terminal, o momento em que as cargas estarão disponíveis para o carregamento (prontidão de carga), tipos de produtos (dimensões/pesos), janelas para carregamento e quantidades por destino.

A partir de tais informações e junto com possibilidades carga *spot* informados pelos departamentos comerciais, o departamento de *Fleet Scheduling* faz a alocação dos navios para cada linha. Tem-se como exemplo a definição de que o navio A após a descarrega no Brasil realizará a linha Brasil-Ásia. Tal alocação baseia-se principalmente na capacidade dos navios para transporte de todo o volume declarado, mas também inclui as necessidades de *drydock* (manutenção em doca seca), demandas comerciais a partir da descarga, etc. Destaca-se que, possivelmente devido à falta de capacidade própria nas datas solicitadas, pode-se afretar temporariamente um navio no mercado para cumprir as necessidades comerciais.

Com a “Declaração de Volume” e os navios já alocados para cada linha, a equipe comercial de cada rota define a rota e as quantidades que cada navio carregará em cada porto para atendimento das datas solicitadas para os próximos 30-40 dias, sendo este o tempo utilizado neste trabalho como horizonte de estudo. Dentre os mercados operados, o estudo aqui será realizado para os navios na rota Brasil–Ásia. Atualmente, são alocados em média entre 5 a 8 navios/viagem por mês para trabalharem nessa rota, sendo que essa quantidade está sujeita a variações, conforme a demanda e disponibilidade de embarcações.

3.2.2. Fracionamento dos pedidos

No presente trabalho, é entendido como pedido a combinação de cliente, porto de carregamento, porto de descarga, quantidade do pedido, janela para chegada no porto de carregamento e tempo de trânsito. Como exemplo de pedido tem-se o cliente A, saindo de Santos (Brasil) com destino para Zhuhai (China), para 10.000 toneladas de um dado produto, sendo que o(s) navio(s) que realizarão tal transporte devem chegar ao porto de carregamento entre os dias 01 e 10 do mês e tal carga deve chegar no porto de descarga em até 65 dias após a saída do porto de carregamento.

Em linha com a realidade da empresa para a rota, os pedidos podem ser atendidos por mais de um navio. Conforme explicado por Christiansen *et al.* (2014), muitos modelos trabalham com o princípio de que um pedido somente pode ser carregado por um único navio. Tal premissa é bastante razoável para o modelo *tramp*, uma vez que as negociações *spot* acontecem para uma determinada quantidade e para a duração de uma viagem, o que leva todas as partes a solicitarem que toda a carga esteja em somente um navio. Ademais, embarques de carga granel de grande volume como minério de ferro e soja, por exemplo, são usualmente negociados em volumes suficientes para encher um navio inteiro visando beneficiarem-se de economias de escala, que levam à redução do frete marítimo e logo ampliam as margens financeiras para os afretadores de tais *commodities*.

No escopo desse trabalho, ao trabalhar com o fracionamento de carga, que é a natureza dos embarques de cargas do tipo *Break-bulk*, onde são agregados mais

de um pedido e embarcadores, é fundamental poder realizar a divisão dos volumes dos pedidos em mais de um navio. Para tal, deve-se relaxar a restrição de que cada pedido deve somente ser transportado por um navio. Na Figura 1 mostram-se os benefícios dessa divisão. No caso sem divisão de pedidos, o navio com capacidade para 45 unidades carrega, inicialmente, o pedido de 30 unidades no porto 1, segue para descarga, regressando a fim de carregar no porto 3 as 20 unidades desse pedido. Enquanto isso, o navio 2, de capacidade de 60 unidades, transporta somente o pedido 2, de 55 unidades. Com o modelo de fracionamento, o navio 1 consegue transportar todo o pedido 1 e parte do pedido 3 (15 unidades), enquanto o navio 2 carrega o pedido 2 e o restante do pedido 3. Assim, pode-se perceber a grande contribuição do fracionamento dos pedidos, já que permite utilizar ao máximo a capacidade dos navios e evita alocação de capacidade extra, reduzindo o número de viagens – no exemplo o sistema sem fracionamento de pedidos teve três viagens e no cenário com fracionamento foram somente duas viagens. Conclui-se que o modelo de navios dedicados a pedidos aumenta os custos para o armador, os quais provavelmente serão repassados aos clientes nos fretes.

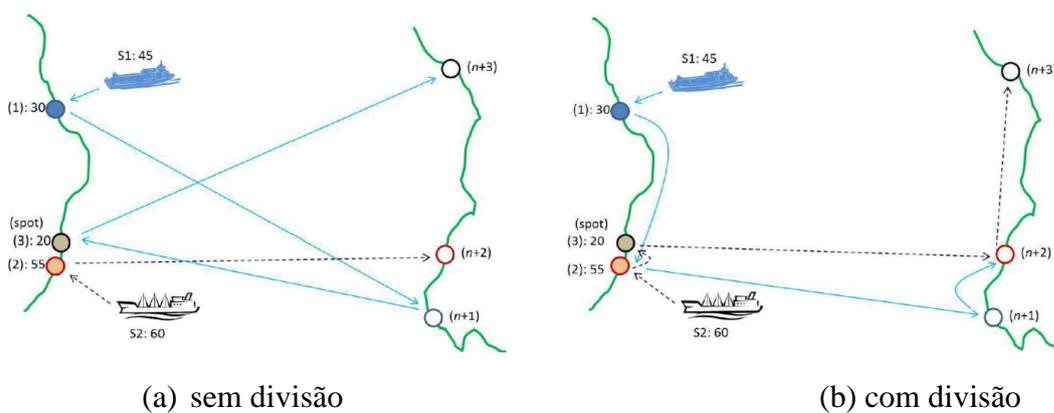


Figura 1 - Exemplo de solução com e sem divisão dos pedidos

Fonte: Christiansen *et al.* (2014)

Para assumir tal premissa é fundamental entender a natureza do produto transportado e entender que é razoável assumir a possibilidade de acomodar dois pedidos/produtos em um mesmo porão do navio. Com isso, para esse trabalho, não são analisadas as estivagens das cargas e os detalhes da alocação de mais de um produto em um porão. A título de exemplo, carga granel, como concentrados de cobre, não podem ser carregados no mesmo porão de paletes de madeira, podendo estar no mesmo navio em porões distintos.

3.2.3. Portos e rota base

Para o problema estudado nesse trabalho são considerados quatro portos de carregamento localizados no Brasil e doze os portos de descarga na China, Coréia do Sul e Japão. Um mesmo porto de carregamento pode ter mais de um embarcador, bem como vários afretadores podem descarregar no mesmo destino, muitas vezes por serem hubs globais de sua *commodities*.

Saindo da costa leste da América do Sul, os navios podem seguir em três diferentes caminhos com destino para os portos da Ásia, sendo este: via Estreito de Magalhães, via Canal do Panamá ou via Cabo da Boa Esperança/Cingapura.

A primeira opção de análise de rota é através do Estreito de Magalhães, que conecta os oceanos Atlântico e Pacífico. Conforme a Figura 2 ilustra, o total de milhas náuticas percorridas, dada a saída de Santos (principal porto da costa brasileira) até Changshu (principal porto de atendimento na rota estudada), são de 12.300 m.n., que considerando uma velocidade média de 12,5 nós, levaria aproximadamente 41 dias de viagem. Em relação a outros custos de viagem, além do custo operacional diário do navio e combustível, ambos diretamente relacionados à duração da viagem, existe um custo de praticagem e de rebocadores durante a passagem pelo Estreito de Magalhães, uma vez que frequentemente há más condições meteorológicas devido ao encontro dos Oceanos Atlântico e Pacífico e que, em caso de navio carregado, podem colocar em risco a integridade da tripulação e do navio.



Figura 2 - Mapa da rota - Brasil – Estreito de Magalhães - China

Fonte: Autor.

Outra opção seria através do Canal do Panamá. Nesta, os navios seguiriam para o norte ao sair de Santos (Brasil), e passariam pelo Canal do Panamá, conforme ilustrado na Figura 3. Esse é um complexo sistema de eclusas que permitem o cruzamento entre os Oceanos Atlântico e Pacífico, como alternativa ao cruzamento via Cabo Horn/Estreito de Magalhães. Dessa forma, para a mesma rota Santos-Changshu, são percorridos 13.165 m.n., considerando que a mesma velocidade média de 12,5 nós, levaria aproximadamente 43,88 dias. Além das restrições físicas do canal que limita a alguns navios da frota, é cobrado um valor entre \$150.000 a \$220.000 por trânsito de navio.



Figura 3 - Mapa da rota - Brasil – Canal do Panamá - China

Fonte: Autor

Definida a rota base padrão, é feito o roteamento detalhado, com a definição dos portos, quantidades e instruções de velocidades, com foco em maximizar o retorno financeiro dado pelo frete por carga embarcada, deduzindo custos de consumo de combustível, despesa portuária e fixo diário do navio (já tratados anteriormente), atendendo às restrições de atendimento (toda carga de contrato tem que ser transportada respeitando os termos contratuais); portuárias (restrições físicas nos portos) e de estivagem (capacidade operacional e física nos compartimentos disponíveis no navio).

3.2.4. Velocidade e Consumo de Combustível

Na realidade da rota estudada, todos os navios após o carregamento seguem para Cingapura para abastecerem e de lá seguem para os respectivos portos de descarga. Apesar das políticas de combustíveis não serem contempladas nesse estudo, no caso da empresa estudada, o porto de Cingapura é parada obrigatória para abastecimento de todos os navios da linha Brasil-Ásia. Tal decisão se deve ao valor do combustível em Cingapura ser menor do que em quaisquer outros portos de carregamento e descarga da rota, conforme indicado pela Figura 5. Como premissa, todos os navios dentro do mesmo horizonte serão analisados consumindo combustível com o mesmo preço, que é o valor médio de Cingapura para o respectivo período de otimização do roteamento e programação dos navios.

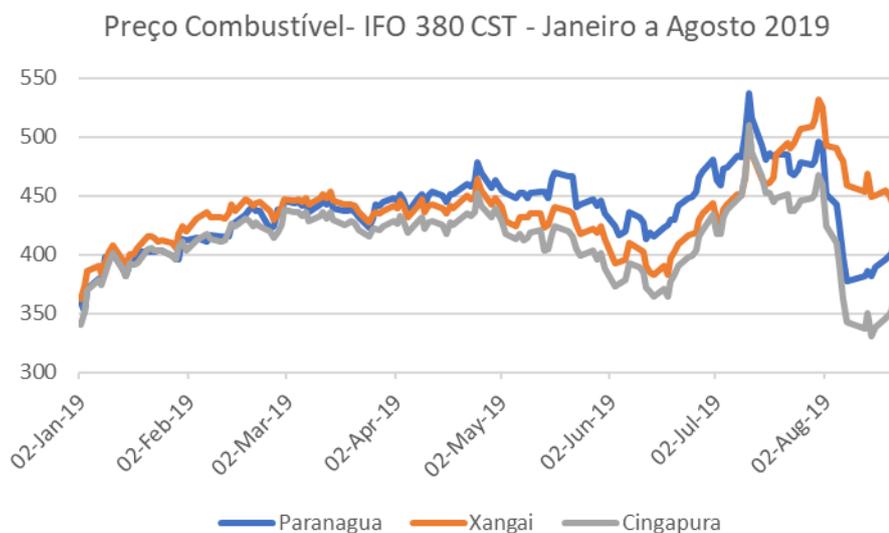


Figura 5 - Comparação preço combustível - IFO 380 – 2019.

Fonte: Adaptado de OilMonster (2019)

Os custos de combustível são um dos principais custos que se tem no transporte marítimo. Segundo Wang *et al.* (2019), o custo de combustível representa geralmente 50% a 75% do custo operacional da viagem, sendo que a menor flutuação no preço do combustível gera um grande impacto no resultado financeiro da viagem marítima. Os custos de combustível estão diretamente relacionados à distância percorrida, à velocidade e ao consumo por dia de cada navio.

O preço do combustível de navios tem constantes variações que são dependentes desde a relação oferta-demanda, até questões geopolíticas. O custo com combustível é o maior componente quando analisados os custos operacionais da viagem. Quando o preço sobe consideravelmente, torna-se ainda mais relevante avaliar as inúmeras possibilidades de velocidade e consumo que ao mesmo tempo reduzam o custo e atendam às necessidades comerciais. Conforme indicado por Christiansen *et al.* (2013), ao reduzir a velocidade de navegação em 10%, pode chegar a reduzir o consumo de combustível em 20%. Além disso, poder alterar a velocidade dos navios pode viabilizar datas e negócios, contribuindo assim para o aumento do faturamento.

Quanto à velocidade, diferente para cada navio, as embarcações podem seguir três instruções: *Full Speed*, *Economical Speed* e *Super Economical Speed*. Tais instruções são a maneira interna de comunicação entre as gerências de operações e os respectivos navios para cada trecho. Cada navio tem uma das três instruções como padrão para todos os trechos, esteja o navio carregado ou não. Em situações específicas, é possível solicitar ao navio o ajuste da velocidade para atender uma certa data específica ou consumo individualizado. No entanto, tais tipos de instrução são raros e comumente utiliza-se a instrução padrão.

Psaraftis (2017) discute que assumir velocidade fixa pode reduzir a flexibilidade na tomada de decisão e obter soluções sub-ótimas. Como exemplo, o autor apresenta um caso de navio com velocidade fixa que chega no porto antes do início da janela, logo tem que esperar incorrendo em custos com o navio parado. A possibilidade de poder ajustar a velocidade do navio permite diminuir custos com combustível e poder chegar no porto sem esperar.

Apesar de se ter uma instrução ótima para um navio específico em um dado trecho, é possível que essa instrução específica para tal navio não contribua para o resultado global de toda a frota da linha ou da empresa. Por exemplo, ao reduzir a velocidade dos navios, pode-se necessitar de mais capacidade para assumir todos os compromissos assumidos pela empresa estudada em todas as demais rotas em que atua. Ao mesmo tempo, navios circulando em velocidade alta podem levar ao desbalanceamento da oferta-demanda de capacidade de transporte e, conseqüentemente, queda nos valores de frete. Nesse contexto surge a discussão do custo de oportunidade da carga a bordo para o embarcador, uma vez que quanto menor a velocidade do navio, maior é esse custo (Maloni *et al.*, 2013).

3.2.5. Despesas Portuárias e Custos Operacionais Diários

As despesas portuárias incidem para cada porto que o navio atraca, comumente denominado “chamada portuária”. Os custos são em parte fixos e variáveis (dependendo do tempo de estadia no porto). Para fins desse trabalho, os custos fixos correspondem a 98% do custo total da chamada portuária. Logo, serão tratados como custos fixos por porto que o navio atraca, sem considerar a parte variável.

À medida que o número de portos escalados reduz, menor é o custo portuário para a viagem. Essa pode ser uma das principais diferenças do modelo *tramp* com o modelo *liner*. Neste, a quantidade de portos e a duração de estadia não varia. Enquanto no *tramp* é possível reduzir a quantidade total de portos e estadia nos portos, desde que atendidas as necessidades dos clientes.

Para cada tipo de navio é associado um custo operacional diário (USD/dia), independentemente da rota/viagem, para cobrir despesas operacionais (tripulação, manutenção, certificados, seguro, etc.). Navios maiores e mais antigos tendem a possuir custo diário mais alto quando comparado aos demais.

3.2.6.

Outras restrições: Janela de Carregamento, Tempo de Trânsito, Posição e Momento Inicial no Sistema, Capacidade dos Navios

A restrição de atendimento tende a ser uma das mais complexas. Parte-se da premissa de que toda carga de contrato (COA) tem que ser carregada. Além do volume declarado por destino, é especificado o prazo (pode variar de 7 a 10 dias) para o navio se apresentar em cada porto para carregar o volume declarado. Tal janela é usualmente definida pelo cliente a partir da data de prontidão de carga no porto de carregamento. No entanto, em alguns contratos, a definição da janela é do armador, feita com razoabilidade perante as prontidões de carga dos clientes nos portos.

Caso o navio chegue antes do início de tal janela, o embarcador não tem nenhuma obrigação de iniciar o embarque, pois o tempo de cálculo de *laytime* não é iniciado. Segundo a BIMCO (2013), *laytime* pode ser entendido como o período de tempo acordado entre as partes durante o qual o armador manterá o navio disponível para carregamento ou descarregamento sem pagamento adicional ao frete. *Demurrage* é um montante acordado a ser pago pelo embarcador ao armador em relação ao atraso do navio, uma vez expirado o prazo da *laytime*, pelo qual o armador não é responsável (BIMCO, 2013). Logo, caso o navio chegue antes da janela, o armador assume o custo diário do navio sem nenhuma compensação. Especificamente neste trabalho nenhuma receita ou custo com *laytime* é considerado para esse trabalho, uma vez que é objetivo do armador aumentar a utilização e giro das suas embarcações e, assim, reduzir a pressão para aumento de capacidade/aquisição de navios.

Outro problema consiste em quando o navio chega após a janela acordada. Nestes casos é comum ter o provisionamento em contrato de que o acordo de transporte firmado não tem mais valor. Com isso, o embarcador pode encontrar outro armador para transportar a sua carga. Em situações de mercado com fretes baixos, é muito comum que este tipo de ação ocorra. Com o mercado favorável aos armadores, estes conseguem negociar a extensão das datas. Tais datas servem para dar maior previsibilidade e planejamento para os embarcadores transportarem suas cargas para os portos e administrar possíveis atrasos de congestionamento nos portos escolhidos. De igual maneira, o armador passa a ter que cumprir com as datas

firmadas e a referência ao início do cálculo de tempo para avaliar se haverá *demurrage* a ser cobrado.

Um ponto de grande importância é o local do início da rota do navio. Uma opção é deslocar o navio vazio direto de outro continente para o primeiro porto da próxima rota/viagem. Essa instrução é definida pelo departamento de *Fleet Scheduling*. O mais frequente é que os navios sejam descarregados na costa brasileira e que, após concluir toda descarga, comecem a rota/viagem seguinte. Uma rara situação é quando são feitas chamadas de carregamento entre portos de descarga da rota/viagem anterior. Nesse caso, é importante a análise dos termos comerciais/contratuais para não comprometer o tempo de viagem máximo estabelecido para ambas as viagens. Os contratos podem definir o tempo de trânsito máximo entre a saída do porto de carregamento até o respectivo porto de descarga e as respectivas punições previstas no respectivo contrato no caso de serem excedidos.

Relacionado ao tempo de viagem, cada navio tem diferentes números de guindastes, capacidade de equipamento, dimensão do porão, visibilidade do operador de guindaste para manuseio da carga. Para cada porto entende-se que a mesma equipe de estivadores trabalha para toda a carga. Com isso, baseado em séries históricas, pode-se ter a produtividade média do embarque (toneladas/dia). Tal medida é denominada como o tempo de permanência no porto, sendo contabilizada a partir do início da janela do pedido.

Devido à frota ser heterogênea e cada porto ter suas respectivas restrições, é fundamental navios carregarem até o máximo da capacidade permitida e poderem acessar tais portos. O primeiro elemento são as restrições físicas como comprimento ou largura dos navios que não permitem acessar alguns portos. Para outros portos, devido à falta de estrutura física dos berços de atracação, são exigidas restrições de calado para entrar e sair do porto. Conforme explicado na Figura 6, calado é a profundidade a partir da linha d'água. Assim, quanto mais carga a bordo, mais profunda fica a embarcação e mais próxima de atingir o limite de profundidade do porto. Com isso, calcula-se a capacidade máxima de carga a bordo dada a restrição de profundidade e densidade da água. Para todos os navios da frota se tem definido o que tais restrições refletem em cada carga a bordo.

Malaguti *et al.* (2017) destacam a questão do calado como um tema cada vez mais importante nos debates sobre transporte marítimo. Os autores explicam que os

novos navios estão cada vez maiores, tendo como referência o fato de que o tamanho médio de navios de contêineres aumentou em 19% entre janeiro de 2007 e janeiro 2011 (Notteboom e Vernimmen, 2009). No entanto, tal aumento não é seguido pelas melhorias em infraestrutura portuária, uma vez que são mais caras e necessitam de um maior tempo de implementação.

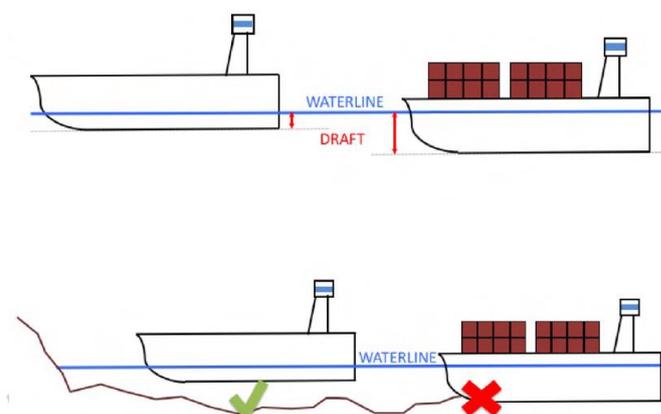


Figura 6 - Impacto das restrições de calado na capacidade dos navios

Fonte: Malaguti e al (2017)

Baseado na estrutura de Trottier e Cordeu (2019), o problema a ser resolvido pode ser resumido como:

- 1) Objetivo – minimização dos custos
 - a. Custo operacional do navio
 - b. Custo combustível
 - c. Custos portuários (praticagem, rebocadores, wharfarge, taxas, etc).
- 2) Tipo de Operação
 - a. *Pick-up* e *Delivery* (Coleta e Entrega)
 - b. Múltiplos portos de carregamento e descarga
- 3) Frota
 - a. Frota fixa do tipo open hatch box shaped
 - b. Frota heterogênea
 - i. Diferentes capacidades (peso e volume)
 - ii. Diferentes velocidades

- iii. Diferentes consumos de combustível
 - iv. Diferentes produtividades
- 4) Cargas
- a. Frete fixo por tonelada
 - b. Janela de chegada no porto de carregamento
 - c. Toda carga deve ser atendida pela frota
 - d. Restrições de tempo de trânsito (transit. time) até o destino
 - e. Mesmo pedido pode ser fracionado para mais de um navio (*split load*)
 - f. Não há restrição de compatibilidade de carga no mesmo porão
 - g. Armador responsável somente pelo transporte de carga – toda operação de carregamento e descarga os custos são dos afretadores.

3.3. Programação de Navios

Na empresa estudada, o planejamento dos navios vem sendo feito manualmente com o apoio de planilhas, baseado na experiência e no conhecimento do planejador.

A rotina do programador, ao receber a indicação de quais navios vão para cada rota, começa ao avaliar as inúmeras variáveis para buscar otimizar a programação dos embarques. Dado que a maior parte dos pedidos são de contrato (COA) ou *spot* anteriormente já fechadas, o foco do programador recai sobre a minimização dos custos.

Com o grande impacto dos custos relativos a tempo, como o operacional diário e de combustíveis na viagem, o programador tende a alocar o navio no porto de carregamento mais próximo de onde terminou a descarga. No entanto, pode ser que o navio esteja muito antecipado para as janelas de carregamento daquele porto e assim haja a necessidade de se esperar algum tempo. Por outro lado, pode ser que seja um porto altamente congestionado ou com baixa produtividade e a alocação de um navio grande naquele porto pode travar uma capacidade necessária em outros portos. Outro ponto de relevância são os portos de descarga, que levam a viagens

de maior duração e consumo de combustível. Assim, o programador tem que alocar o navio no porto de carregamento que tenha o consumo de combustível diário mais eficiente e menor custo operacional diário para cumprir a maior rota.

Dadas essa inúmeras variáveis, o programador utiliza uma planilha para tentar estimar os custos totais para diversos cenários de alocação. Nessa planilha são considerados custos operacionais diários, custo de combustível e custos portuários, alinhados com os trabalhos de Brown *et al.* (1987), Perakis e Bremer (1992) e Christiansen *et al.* (2007). A solução que tiver o menor custo total e ainda atender às necessidades comerciais é escolhida pelo programador. Tais dados compõem um dos principais indicadores da organização, que é o retorno financeiro de cada viagem. Outra referência de aferição é o nível de serviço perante os termos contratuais, como o tempo de trânsito e as janelas de carregamento.

Christiansen *et al.* (2004), Baush *et al.* (1998) e Fagerholt (2004) analisaram cenários de grandes frotas e inúmeras variáveis, as quais fazem com que os problemas de grande complexidade sejam resolvidos através de planilhas pelos programadores. Ademais, exige-se do planejador uma vigilância constante das necessidades comerciais, das mudanças nos tempos de permanência dos portos ou das quebras/atrasos dos navios, o que leva a revisões constantes das programações dos navios. Com isso, a necessidade de se aperfeiçoar o processo de roteamento e programação dos navios, tornando-o mais eficiente está alinhada com o objetivo desse trabalho, que é desenvolver sistemas de apoio a tomada de decisão baseados em otimização.

4 Modelagem Matemática

Neste capítulo são definidos os conjuntos, parâmetros e variáveis do modelo, assim como a descrição do problema. Em seguida é apresentado o modelo roteamento e programação de navios *tramp*.

4.1. Conjuntos, parâmetros e variáveis

A Tabela 3 apresenta os conjuntos que são utilizados no modelo matemático. O modelo em alguns momentos trabalha de forma separada em relação aos portos de carregamento em comparação com os de descarga. Isso ocorre devido à natureza da rota estudada, na qual todos os navios de carregamento estão próximos e em que de tal polo os navios partem para Cingapura. De lá, são descarregados conforme os pedidos realizados.

Outra consideração do modelo é a discriminação das possíveis velocidades performadas (V) em três tipos: 1 (*full speed*) que é a maior velocidade performada possível pelo navio, 2 (*eco speed*) velocidade onde há o maior rendimento consumo e velocidade e 3 (*super eco speed*), que é a menor velocidade possível a ser realizada pelo navio.

Tabela 3 - Conjuntos

Nome	Descrição
N	Conjunto dos Portos, com os índices i e j
N_c	Sub-conjunto dos Portos de carregamento, com os índices i e j
N_d	Sub-conjunto dos Portos de descarga, com os índices i e j
K	Conjunto dos Navios, com o índice k
R	Conjunto dos Pedidos, com o índice r
V	Conjunto das Velocidades: 1 (<i>full speed</i>), 2 (<i>eco speed</i>) e 3 (<i>super eco speed</i>)

Fonte: Autor

Os parâmetros do modelo são indicados na Tabela 4. Os dois primeiros parâmetros apresentados são referentes à posição e ao momento inicial de cada navio alocado para realizar aquela rota. A partir daquele momento, começa-se a

somar todo tempo para cada navio no modelo referente à navegação entre dois portos ou de estadia em cada porto, seja operando, seja aguardando.

Um fator relevante em relação às datas são as distâncias percorridas, que acontecem sempre entre dois portos, no caso entre i e j . Neste caso é uma matriz, de todos os portos para todos os portos.

Tabela 4 - Parâmetros

<i>Nome</i>	<i>Descrição</i>
O_k	Representa o ponto inicial de cada navio k no sistema
Z_k	Representa o dia inicial de cada navio k no sistema
$D_{i,j}$	Distância em milhas nauticas entre i e j
$Q_{i,k}$	Capacidade máxima que o navio k consegue ter para operar no porto i
c	Nó representa o porto de Cingapura
F	Nó artificial onde todos navios terminam
CD_k	Custo diário do navio k – Dólares Americanos
CP_i	Custo Portuário por porto i
$Prod_{i,k}$	Produtividade (toneladas por dia) do navio k no porto i
$S_{k,s}$	Velocidade do navio k na instrução de velocidade s
$CC_{k,s}$	Consumo diário de combustível (em toneladas) do navio k na instrução de velocidade s
LE_r	Dia inicial da janela do pedido r no seu porto de carregamento
LB_r	Dia final da janela do pedido r no seu porto de carregamento
TT_r	Tempo de trânsito do pedido r
BP	Preço do combustível – Dólares americanos por tonelada
R_i	Grupo dos pedidos em cada porto i
Ol_r	Grupo dos portos de origem para cada pedido r
Od_r	Grupo dos portos de descarga para cada pedido r
Oq_r	Grupo do total de carga para cada pedido r

Fonte: Autor

O modelo apresenta seis variáveis de decisão ao todo, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Variáveis de decisão

<i>Nome</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descrição</i>
x_{ijk}	Binária	1, caso o navio k percorra o nós i e j . Caso contrário recebe o valor 0.
z_{ikr}	Contínua	Quantidade de carga carregada do perdido r carregado/descarregado no porto i a bordo do navio k
y_{rk}	Binária	1, caso o pedido r seja carregado no navio k . Caso contrário recebe o valor 0.
w_{ik}	Contínua	Quantidade de carga no navio k após operar no porto i

s_{ijkv}	Binária	1, caso seja a velocidade do tipo V entre os trechos i e j realizada pelo navio k . Caso contrário recebe o valor 0.
t_{ik}	Contínua	Tempo do navio k chegado no porto i

Fonte: Autor

O primeiro conjunto de variáveis do modelo refere-se à rota que o navio segue perante o modelo. Associada ao índice k que especifica o navio em questão, a variável assume o valor de 1 caso o navio k passe pelo arco que liga os nós i e j . A título de ilustração, Lin e Liu (2011) demonstram como funciona essa estrutura para um cenário de dois navios e nove cargas. Na Figura 8, o navio 1 passa pelos nós em sequência A, B, I, D, K, B e E, transportando os seguintes cinco pedidos: A/D, B/I, I/K, D/K e B/E. Para esclarecer, a nomenclatura se refere ao par origem e destino de cada pedido, ou seja, A/D representa o pedido carregado em A e descarregado em D. O navio 2 segue a sequência de nós F, J, K, E, A e C, com quatro pedidos F/J, F/K, K/E e A/C. Destaca-se que em cada arco percorrido o navio pode ou estar vazio, ou com somente um pedido a bordo, ou com múltiplos pedidos a bordo. Como exemplo, o navio 1 percorre o arco A/B somente com o pedido A/B enquanto o navio 2 percorre o mesmo arco com os pedidos A/D e B/I a bordo. No modelo estudado os navios não regressam para o ponto de origem. Essa é uma das grandes diferenças entre roteamento de navios e de veículos, já que estes, usualmente, retornam ao final da rota para garagem de onde partem para uma nova rota. No caso de navios no modelo aqui estudado, as posições iniciais e finais dos navios são distintas, principalmente pelo escopo de embarque no continente sul-americano e descarga na Ásia.

o navio k deve realizar entre os portos i e j , tanto para reduzir custos, quanto para atender as janelas nos portos de carregamento e as restrições de tempo de trânsito dos pedidos.

A última variável do modelo é relacionada ao tempo. Assim, de maneira contínua, tem seu ponto inicial ($t = 0$) igual para todos os navios, associado ao início do modelo. Tal momento é anterior a qualquer início de navio e a qualquer janela de atracação. A variável t_{ik} busca rastrear o momento da chegada do navio k em cada porto i .

4.2. O Modelo

Uma vez que os conjuntos, parâmetros e variáveis foram apresentados, segue a formulação matemática baseada em Korsivk *et al.* (2010), sendo adicionados restrição de tempo de trânsito e as variáveis de decisão de instrução de velocidade. O modelo tem como função objetivo (1):

$$MIN Z = \underbrace{\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in N} (CP_i x_{ijk})}_{\text{Custo Portuário}} + \underbrace{\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in N} \sum_{v \in V} (s_{ijkv} S_{kv} CC_{kv} BP)}_{\text{Custo Combustível}} + \underbrace{\sum_{k \in K} (t_{Fk} - Z_k) CD_k}_{\text{Custo Operacional Diário}} \quad (1)$$

A função objetivo (1) para problemas de navio *tramp* usualmente é de maximização, somada às variáveis de quantidade multiplicadas pela receita por tonelada. Para o escopo deste trabalho, a fim de validar a estrutura de modelagem e comparar com casos práticos já ocorridos, será considerado que toda a receita é conhecida, dado que toda carga será transportada. Ademais, os fretes são independentes das rotas realizadas e das datas de carregamento. Com isso, foi considerado, para o escopo desse trabalho, a função objetivo de minimização de custos. Esta é constituída por três partes:

1. Custo Portuário: para cada porto chamado (variável x_{ijk} igual a 1), o respectivo custo para chamar tal porto se aplica. No caso do problema, os custos portuários não variam por tipo de navio, nem por tempo de

estadia. Tal premissa é razoável uma vez que as despesas portuárias são em sua grande maioria taxas fixas. Por exemplo, dentro desse tarifário se encontram custos de praticagem, rebocadores, taxa de farol, taxas de imigração/alfandega, taxa de atracação, etc.

2. Custo Combustível: tal custo relaciona-se com a variável de decisão s_{ijkv} , que define a instrução de velocidade que o navio k realizará e o trânsito entre os portos i e j . Para cada instrução, o navio k terá uma velocidade em nós e um respectivo consumo de combustível (toneladas/dia). Por exemplo, um dado navio eficiente energeticamente pode ser instruído a realizar longas distâncias a uma velocidade maior e ao final ter um consumo menor do que se reduzisse a velocidade. Para o escopo desse trabalho o preço de combustível (\$/tonelada) é o mesmo para todos os navios. Tal premissa é devido à política de combustíveis de empresa, onde os preços de Cingapura são sempre mais baixos que o realizados nos portos brasileiros. Com isso, qualquer combustível abastecido em portos sul-americanos são somente para alcançar o porto de Cingapura. Nesse porto é assumido, para fins de tomada de decisão, que todos os navios abastecem ao mesmo preço. O preço do combustível é altamente dinâmico e de difícil previsão, uma vez que é muito impactado por questões geopolíticas.
3. Custo Operacional Diário: cada navio tem um custo operacional próprio, que engloba custos operacionais do navio como manutenção, peças e tripulação, incluindo custo de capital do *leasing* da embarcação. Para se calcular o tempo total do navio no sistema faz-se a redução do tempo após a conclusão da operação no último porto de descarga do momento que o navio fica disponível no sistema (parâmetro Z_k).

A função objetivo é sujeita às seguintes restrições:

$$(2) \quad \sum_{i \in N} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in K, j \in N$$

$$(3) \quad \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in K, i \in N$$

As restrições (2) e (3) contemplam uma premissa do problema onde cada navio passa somente uma vez pelo porto, seja de carregamento, seja descarga. Com isso, na restrição (2) refere-se à saída em cada porto e a restrição (3), à chegada.

$$(4) \quad \sum_{i \in N} x_{ijk} - \sum_{i \in N} x_{jik} = 0, \quad \forall k \in K, j \in N \setminus \{O_k, F\}$$

$$(5) \quad x_{ijk} + x_{jik} = 1, \quad \forall k \in K, i \in N, j \in N$$

$$(6) \quad \sum_{j \in Nc} x_{O_kjk} = 1, \quad \forall k \in K$$

$$(7) \quad \sum_{i \in Nc} x_{iC_kk} = 0, \quad \forall k \in K$$

$$(8) \quad \sum_{j \in Nd} x_{C_kjk} = 0, \quad \forall k \in K$$

$$(9) \quad x_{ijk} = 0, \quad \forall k \in K, i \in Nc, j \in Nd$$

$$(10) \quad \sum_{i \in Nd} x_{iF_kk} = 1, \quad \forall k \in K$$

$$(11) \quad \sum_{i \in Nc} x_{iF_kk} = 0, \quad \forall k \in K$$

$$(12) \quad \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} \geq 1, \quad \forall i \in N$$

As restrições (4) a (12) servem para garantir o fluxo dos navios entre os portos de carregamento e descarga. Assim, as restrições (4) garantem o equilíbrio do fluxo, no qual todo porto a que se chega se deve sair, com exceção dos portos iniciais de cada navio no sistema e o porto artificial F_k , onde todos os navios terminam. As restrições (5) buscam evitar loops entre nós, motivando a ideia de que o navio sempre parta para um porto distinto do anterior. Essa premissa é razoável, tendo em vista o alto custo de duas chamadas no mesmo porto e o estudo de capacidade feito para alocar a frota que percorrerá aquela rota. Possivelmente pode-se relaxar tal restrição para permitir mais de uma chamada no mesmo porto em cenários de atendimento de datas. No entanto, em termos práticos, o time comercial usualmente consegue um acordo com o cliente para todo atendimento em uma única chamada.

Para entendimento das restrições (6) a (10) deve-se entender a rota estudada. Conforme explicado anteriormente, todos os portos de carregamento se encontram na costa leste da América do Sul, mais especificamente na região Sul e Sudeste do Brasil. Todos os navios seguem para Ásia via Cabo da Boa Esperança, rota Oeste-Leste. Com isso, as restrições (6) garantem que todos os navios sigam para algum porto a partir do porto inicial no sistema. As restrições (7) e (8) garantem que todos os navios passem por Cingapura onde, pela política da empresa, as embarcações são abastecidas. Soma-se a isso que todos os navios encerram no nó artificial F_k , o qual garante o fim dos navios no sistema e apoia restrições relativas à duração das viagens. Com isso, as restrições (10) garantem que a partir dos nós de descarga (conjunto Nd), tenha-se um arco até o nó artificial F . Apesar de redundantes, as restrições (9) e (11) visam auxiliar o desempenho computacional do modelo. As restrições (9) garantem que não haja arco entre os portos de carregamento (conjunto Nc) e descarga (conjunto Nd), garantindo que se passe por Cingapura. Igualmente, as restrições (11) garantem que somente os portos de descarga tenham a possibilidade de conectar com o nó artificial F . As restrições (12), por fim, se referem que toda a carga deve ser transportada.

$$(13) \quad w_{O_kk} = 0, \quad \forall k \in K$$

$$(14) \quad w_{F_kk} = 0, \quad \forall k \in K$$

A restrição (13) garante que todos os navios iniciam no sistema com zero de carga a bordo. Tal restrição vai em linha com a operação usual da organização estudada, na qual os navios, em sua grande maioria, têm início na rota para carregamento sem outra carga a bordo. Tal se deve a questões usuais de tempo de trânsito, bem como dificuldade de sincronização das datas nos portos de descarga na costa sul-americana. A restrição (14) garante que no nó artificial F o total de carga a bordo seja zero, com isso força que os navios carreguem e descarreguem toda a carga nos devido portos.

$$(15) \quad \sum_{r \in Ri} z_{ikr} \leq w_{ik} \leq Q_{ik}, \quad \forall k \in K, i \in N$$

$$(16) \quad \sum_{r \in R_i} z_{ikr} + w_{ik} \leq Q_{ik}, \quad \forall k \in K, i \in Nd$$

Devido à natureza dos navios e dos portos, principalmente os brasileiros, existem restrições que limitam a quantidade possível carregada. No modelo matemático aqui trabalhado, tais restrições são (15) e (16). As restrições (15) garantem que a quantidade de carga após o navio k sair do porto i e seja inferior à capacidade máxima (tonelagem) desse navio, nesse mesmo porto. Bem como, garante que a quantidade w_{ik} (a bordo na saída do porto i) seja superior à quantidade carregada nesse porto. No mesmo sentido, as restrições (16) trabalham para os portos de descarga. Assim, a quantidade do navio k ao chegar no porto de descarga deve ser comparada com a restrição de capacidade. Com isso, deve-se somar a w_{ik} , volume de saída do porto i a todo o volume a ser descarregado naquele porto i .

$$(17) \quad \sum_{k \in K} y_{rk} \geq 1, \quad \forall r \in R$$

$$(18) \quad \sum_{i \in Nc \cup C_k} x_{Ol_rjk} \geq y_{rk}, \quad \forall k \in K, r \in R$$

$$(19) \quad \sum_{i \in Nd \cup F_k} x_{Od_rjk} \geq y_{rk}, \quad \forall k \in K, r \in R$$

A variável de decisão y_{rk} assume o valor de 1 caso o navio k carregue carga do pedido r . Assim, as restrições (17) fazem com que todos os pedidos tenham ao menos um navio alocado. As restrições (18) e (19) garantem que o navio k opere nos respectivos portos de carregamento e descarga do pedido r .

$$(20) \quad \sum_{k \in K} z_{Ol_rkr} = Oq_r, \quad \forall r \in R$$

$$(21) \quad z_{Ol_rkr} \leq Oq_r y_{rk}, \quad \forall k \in K, r \in R$$

$$(22) \quad \sum_{k \in K} z_{Od_rkr} = Oq_r, \quad \forall r \in R$$

$$(23) \quad z_{Od(r)kr} \leq Oq_r y_{rk}, \quad \forall k \in K, r \in R$$

$$(24) \quad z_{Ol,kr} = z_{Od,kr}, \quad \forall k \in K, r \in R$$

Dada a possibilidade de dividir a quantidade de cada pedido em mais de um navio, denominado na literatura de roteamento de navios como fracionamento de pedido, deve-se ter restrições que garantam que toda carga do pedido r seja carregada. As restrições (20) garantem que a quantidade total carregada por todos navios k no nó de carregamento de cada pedido some a quantidade total do pedido. As restrições (21) restringem a um dado navio k que a quantidade a ser carregada no porto de carregamento não exceda a quantidade do pedido r . As restrições (22) e (23) são espelhos, respectivamente, das expressões (20) e (21) para a descarga. As restrições (24) estabelecem que a quantidade carregada do pedido r pelo navio k no porto de carregamento (Ol) deve ser igual à quantidade no porto de descarga (Od) do pedido r .

$$(25) \quad w_{jk} = \left(w_{ik} + \sum_{r \in Ri(j)} z_{jkr} \right) x_{ijk}, \quad \forall k \in K, i \in Nc, j \in Nc \cup C_k$$

$$(26) \quad w_{jk} = \left(w_{ik} - \sum_{r \in Ri(j)} z_{jkr} \right) x_{ijk}, \quad \forall k \in K, i \in Nd \cup \{C_k, F_k\}, j \in Nd$$

A quantidade a bordo dos navios é fundamental em problemas de roteamento de navios, principalmente porque capacidade de carga é comumente uma forte restrição, seja do navio, seja dos portos (calado). Assim foi estabelecida a variável de decisão w_{ik} que representa a quantidade de carga a bordo após o navio k sair do nó i . Com isso, as restrições (25) calculam que a quantidade de carga a bordo do navio k ao sair do nó j é o somatório da quantidade que o navio tinha a bordo quando saiu do porto anterior sendo, neste caso w_{ik} , com a quantidade carregada dos inúmeros pedido no porto j . Destaca-se que tal restrição é condicionada ao navio k ter percorrido o arco (i, j) , caso contrário não há somatório de cargas. Com isso, tem-se uma restrição quadrática.

A linearização da expressão (25), pode ser feita através do método de M-grande, onde se representa a expressão por:

$$(25A) \quad w_{jk} \geq w_{ik} + \sum_{r \in Ri(j)} z_{jkr} - M(1 - x_{ijk}), \quad \forall k \in K, i \in Nc, j \in N \cup C_k$$

$$(25B) \quad w_{jk} \leq w_{ik} + \sum_{r \in Ri(j)} z_{jkr} + M(1 - x_{ijk}), \quad \forall k \in K, i \in Nc, j \in N \cup C_k$$

Conforme indicado por Christiansen *et al.* (2014), é fundamental a boa calibração de M , que pode ser calculado como $M = \max(0, \overline{w_{ik}})$. No mesmo sentido, serve a restrição (26), mas reduzindo do navio a quantidade descarregada no porto j .

$$(27) \quad \sum_{v \in V} s_{ijkv} = x_{ijk}, \quad \forall k \in K, i \in N, j \in N$$

As restrições (27) são referentes à instrução de velocidade. Tais restrições não estão presentes no trabalho de Korsivk *et al.* (2010). Assim, caso o navio k percorra o nó i, j , deve-se associar uma instrução de velocidade para o navio k cursar tal trecho. Conforme apresentado anteriormente, o conjunto V contempla três posições: 1 (*full speed*, velocidade mais alta), 2 (*eco speed* – entre as outras duas) e 3 (*super eco speed* – velocidade mais lenta). Tal discriminação em três níveis de velocidade segue a política interna da empresa estudada para avaliação e instrução dos navios por trecho.

$$(28) \quad t_{0kk} \geq Z_k, \quad \forall k \in K$$

$$(29) \quad t_{jk} \geq \left(t_{ik} + \sum_{v \in V} \frac{s_{ijkv} D_{ij}}{24 S_{kv}} + \sum_{r \in Ri} \frac{z_{ikr}}{Prod_{ik}} \right) x_{ijk}, \quad \forall k \in K, i \in N, j \in N$$

$$(30) \quad LB_r y_{rk} \leq t_{0l_rk} \leq LE_r y_{rk}, \quad \forall k \in K, r \in R$$

$$(31) \quad t_{0d_rk} \leq \left(t_{0l_rk} + \sum_{r \in Ri} \frac{z_{0l_rkr}}{Prod_{0l_rk}} + TT_r \right) y_{rk}, \quad \forall k \in K, r \in R$$

O grupo de restrições de (28) a (31) são referentes ao tempo dos navios no sistema, aqui trabalhados de forma contínua. A primeira, (28), estabelece o momento em que cada navio é disponibilizado para iniciar a rota. A expressão (29) estabelece que o tempo de chegada do navio k no porto j corresponde ao somatório

da saída no porto i , com o tempo de trânsito percorrendo o arco (i, j) e o tempo de operação em i . Semelhante às expressões (25) e (26), dada a condição de ter tal arco se realizado, deve-se multiplicar pela variável x_{ijk} , tornando a restrição quadrática. A mesma pode ser linearizada através do método M-grande.

A restrição (30) estabelece as janelas de chegada nos portos de carregamento conforme declaração do cliente ou termos contratuais. Assim, caso o navio chegue antes do início da janela, ele vai aguardar. Bem como, para esse trabalho, a fim de manter o alto nível de atendimento, não é permitido que os navios cheguem após o término da janela estabelecida.

Dentro do escopo de contratos, estes têm seus termos de tempo de trânsito estabelecidos da saída do porto de carregamento até a chegada nos respectivos portos de descarga. Como é a realidade do problema estudado nesse trabalho e não estão presentes no artigo de Korsivk *et al.* (2010), as expressões (31) foram estabelecidas.

$$(32) \quad x_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, i \in N, j \in N$$

$$(33) \quad y_{kr} \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, r \in R$$

$$(34) \quad s_{ijkv} \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, i \in N, j \in N, r \in R$$

$$(35) \quad z_{ikr} \geq 0, \quad \forall k \in K, i \in N, r \in R$$

$$(36) \quad w_{ik} \geq 0, \quad \forall k \in K, i \in N$$

$$(37) \quad t_{ik} \geq 0, \quad \forall k \in K, i \in N$$

Por fim, as restrições (32) a (37) estabelecem o tipo das variáveis do modelo, binárias ou contínuas.

5 Resultados obtidos

Este capítulo apresenta e analisa os resultados da aplicação do modelo matemático em seis cenários reais, sendo que cada cenário corresponde a um mês diferente de planejamento.

5.1. Aplicação do modelo

O modelo foi resolvido utilizando a linguagem de programação Julia, versão 1.2.0, especificamente a biblioteca JuMP (Dunning *et al.*, 2015) v.0.19.2 e o solver Gurobi 8.1. Para o processamento foi utilizado um computador com processador Intel Core i7-7600U, com CPU 2.80Ghz e 8.00 GB de memória RAM.

O sistema de apoio à tomada de decisão foi aplicado utilizando-se de dados de seis meses de programação real conforme apresentado pela Tabela 6, cada uma com horizonte de tempo entre 30 e 45 dias. A seleção de tais meses foi visando explorar diferentes conjunturas de quantidade de pedidos, número de navios, tonelage de carga total e percentual da tonelage total pela soma da capacidade total máxima dos navios. O objetivo de se comparar com casos reais serve para validar a ferramenta e analisar os resultados obtidos com o realizado pelos programadores.

Tabela 6 – Resumo dos meses replicados

Mês	Pedidos	Navios	Total De Carga	% Capacidade
1	14	3	135,200	86%
2	17	6	335,589	93%
3	13	6	300,646	97%
4	19	7	379,486	95%
5	24	8	429,088	94%
6	13	6	243,577	80%

Fonte: Autor.

As informações das programações reais, conjuntamente com detalhes de portos e navios, foram organizadas em planilhas do *Microsoft Excel*, que são importadas ao início do código de programação. A resolução do problema foi através do método *Branch-and-Bound*. Após a resolução do código, conforme apresentado no Apêndice A, os resultados das variáveis de decisão do modelo são exportados para uma planilha do *Microsoft Excel* onde são apresentadas para análise e validação.

Os cenários aqui trabalhados são comparados com dados finais reais das alocações dos escolhidos meses. Com isso, toda carga do tipo *spot* foi considerada como obrigatoriamente atendida bem como toda a receita de carga como garantida. Com isso, o objetivo é comparar atendimento e custos entre a programação real, realizada por planilhas e pelos programadores, e o modelo desenvolvido nesse trabalho. A partir da validação abaixo, o modelo pode ser implementado para ser aplicado enquanto do horizonte de análise, no propósito de servir como um sistema de suporte à decisão (SSD).

Em linha com o trabalho de Christiansen e Fargherholt (2002) e Diz (2012), os dados iniciais utilizados no modelo podem ser divididos em três grupos: dados fixos, dados dos cenários reais e dados das cargas. O primeiro grupo se refere ao nome do navio, porte bruto e capacidade, velocidade de navegação e consumo de combustível, custos portuários, produtividade em cada porto, distância entre portos.

Os dados dos cenários reais são informações que somente cabem àquele período de análise do mês estudado. A título de exemplo, o preço da tonelada de combustível, a data e localização inicial de cada navio. Por fim, o terceiro tipo de dados são relativos aos pedidos transportados no horizonte de tempo estudado. Para isso são informadas as quantidades, porto de origem e porto de destino, janela de chegada no porto de carregamento, restrições de tempo de trânsito. Esses três grupos de informação são preparados para cada mês estudado, nos quais haverá a comparação entre as saídas do modelo e o realizado pelo programador.

5.2. Cenários Reais

Conforme exposto anteriormente, os dados para validação do modelo seguem as informações realizadas pelos respectivos navios. Com isso, as janelas e os volumes ali definidos foram cumpridos, não sendo permitido qualquer tipo de tolerância ou flexibilidade para volumes e atendimento.

Possivelmente, durante o horizonte de planejamento, os embarcadores solicitaram alterações nos pedidos, sendo até mesmo aumento ou redução na quantidade dessas solicitações. Outro fator de grande variedade são os tempos de permanência nos portos, que são diretamente dependentes da prontidão de carga e quantidade de recursos alocados pelos afretadores para a operação. Bem como, questões meteorológicas e falhas dos equipamentos dos navios, são imprevistos frequentes durante o período de planejamento.

Assim, pode-se dizer que a ferramenta de apoio a decisão gera soluções ótimas de planejamento, caso não tivessem acontecido tais alterações. Com isso, é possível comparar os custos entre a programação realizada e o resultado teórico, auxiliando o time comercial a buscar as devidas compensações dos clientes, uma vez que permitirá avaliar o impacto em todo o planejamento, ao invés de somente uma viagem e os custos extras gerados pelas solicitações fora de prazo dos clientes, conforme praticado atualmente pela empresa.

Apesar do código ter sido gerado após a realização das viagens, seus resultados foram devidamente apresentados aos programadores para validação. Foram três os profissionais que validaram o modelo, sendo o programador atual, com mais de cinco anos de carreira e um ano à frente da programação da linha; o responsável comercial pela linha, com cinco anos de carreira e pelo menos três anos trabalhados na linha e, o terceiro, com mais de vinte e cinco anos trabalhando com programação de navios, sendo muitos desses anos trabalhando no roteamento de navios.

A validação foi baseada basicamente em dois aspectos:

- Viabilidade Operacional: o modelo tem algumas simplificações quando comparado com a realidade como, por exemplo, a possibilidade de combinação de cargas diferentes no mesmo navio. Assim, os entrevistados avaliaram se eram

viáveis as soluções e se as rotas alocadas seguiam a lógica das demandas reais dos clientes e do departamento de *Fleet Scheduling*;

- Custos totais: dado que as bases de dados são iguais às utilizadas pelos programadores, foi validado se o método de cálculo e seus resultados são pertinentes.

Todos os resultados do modelo gerados que serão apresentados na próxima sessão foram validados pelos programadores. Assim, pode-se afirmar que a lógica estabelecida no código e os dados coletados servem como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão.

5.3. Análise dos resultados

Nesta parte do trabalho são comparados os resultados relativos aos seis meses distintos reais. O horizonte de análise é de 30 a 45 dias para cada cenário estudado. Abaixo são apresentados os indicadores usados para validação e comparação do modelo. Assim, foram escolhidos:

- 1) Custo Total (somatório do custo operacional diário, custo portuário e custo de combustível):

Conforme a função objetivo do modelo matemático, tal indicador é a principal referência de comparação da eficácia da ferramenta de apoio à tomada de decisão. O valor é o somatório dos custos operacionais diários, custos de combustível e custos portuários de todos os navios do horizonte de planejamento.

- 2) Número total de dias:

Com o objetivo de integrar com a análise da frota global, incluindo todas as rotas, é foco de a organização diminuir ao máximo o número de dias de navios em uma dada rota. Isto contribui para evitar investimento em capacidade.

- 3) Quantidade total de milhas náuticas percorridas e total de combustível consumido:

O indicador serve para aferir se os navios com menor consumo são alocados nas maiores rotas. Assim, garantindo o menor consumo de combustível e conseqüentemente a menor emissão de gases poluentes para o transporte da carga.

4) Total de Portos

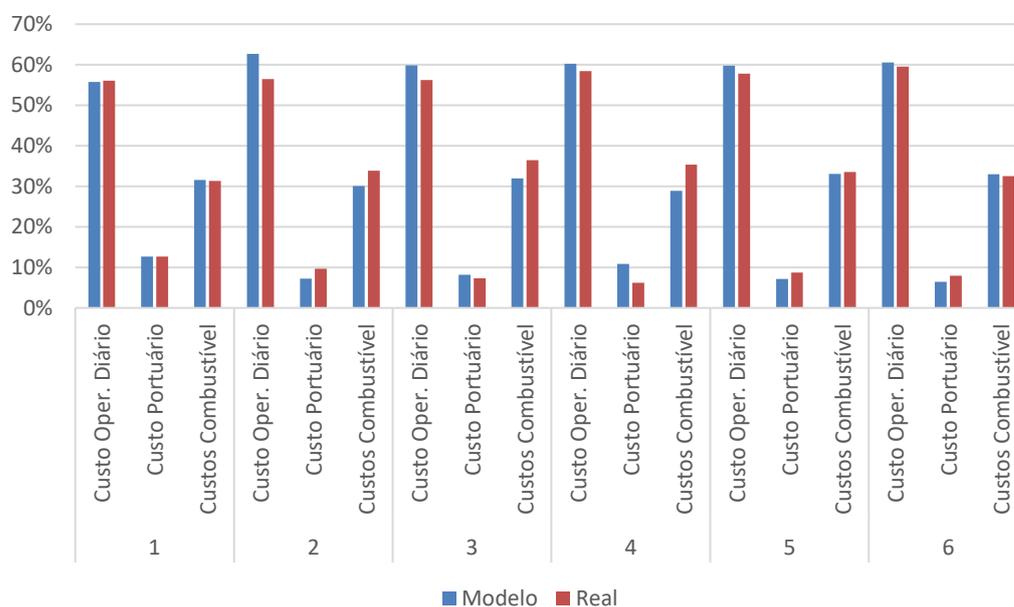
Avaliar a quantidade de portos escalados para o cenário em estudo. Assim, pode-se analisar a exposição do armador a congestionamento, seja com navios de outros armadores, seja entre os próprios navios da sua frota para o mesmo porto. Bem como, cada chamada portuária tem eventos obrigatórios como a navegação entre o ponto de praticagem e o berço, amarração do navio, preparação a bordo, liberação pela autoridade sanitária, abertura de porão, aguardando praticagem, rancho, peças de manutenção, tripulação ou documentação para partida etc. Com isso, reduzir o número de portos contribui para a redução da exposição do armador para atrasos, sendo que tais atividades acontecem independente do volume a ser operado.

Devido à natureza dos acordos comerciais baseado em termos FIOS (*free in and out*), é de responsabilidade dos embarcadores/recebedores a contratação e supervisão dos estivadores, operadores portuários, caminhões e equipamentos, que são os fatores que mais influenciam a melhoria de produtividade. Com isso, os ganhos gerados com a análise pelo modelo, pode-se estimar um potencial referencial de desconto ou investimentos próprios dos armadores para incentivar os afretadores a buscarem a melhoria.

A questão dos custos portuários está diretamente sob controle do armador do caso aplicado. Assim, é possível compreender o potencial de ganho para um dado período e servir como referência para apoiar o incentivo à negociação dos fornecedores na rota, bem como estabelecer metas para as áreas de suprimentos e operação.

Quanto aos custos analisados em todos os meses estudados, percebe-se que, independentemente de ser a programação real ou o resultado da ferramenta de apoio à decisão, tem-se o custo operacional diário como a maior parte dos custos. Em seguida, os custos de combustível e por fim os custos portuários. Para cada mês

estudado percebe-se a diferença entre tais custos, sendo que todos os resultados gerados foram melhores às programações reais. Esses resultados variam de 3% a 7% em redução de custos para um horizonte de planejamento.



Fonte: Autor.

Os resultados dos seis meses estudados para os diversos indicadores estabelecidos são resumidos na Tabela 7, sendo os valores percentuais apresentados como a diferença entre o resultado do modelo menos da programação real, dividido pelo resultado da programação real. Assim, é possível capturar onde houve aumento ou redução para os indicadores quando comparadas as duas programações (real e do modelo).

Tabela 7 – Resumo dos Resultados – Modelo e Programação Real

MÊS	1	2	3	4	5	6
PEDIDOS	14	17	13	19	24	13
NAVIOS	3	6	6	7	8	6
TOTAL DE CARGA (MILHARES DE TONELADAS)	135	335	300	379	429	243
% DA CAPACIDADE TEÓRICA MÁXIMA	86%	93%	97%	95%	94%	80%
# PORTOS DE CARGA	-13%	-25%	27%	36%	6%	-17%
TOTAL C. PORTUÁRIO - CARGA	-8%	-35%	26%	49%	-14%	-13%
# PORTOS DE DESCARGA	0%	-27%	-13%	39%	-18%	0%
TOTAL C. PORTUÁRIO - DESCARGA	-1%	-21%	-14%	84%	-31%	-31%

TOTAL # CHAMADAS	-5%	-26%	4%	38%	-8%	-8%
TOTAL CUSTO PORTUÁRIO	-5%	-29%	6%	67%	-22%	-21%
TOTAL DIAS	-6%	6%	0%	-4%	-1%	-1%
TOTAL CUSTO OP. DIÁRIO	-7%	6%	0%	-2%	-2%	-1%
TOTAL M.N.	0%	-6%	-1%	-9%	-2%	-46%
TOTAL DIAS NAVEGANDO	-6%	1%	1%	-8%	1%	-2%
TOTAL COMBUSTÍVEL	-7%	-18%	-3%	-10%	-6%	-1%
TOTAL CUSTO COMBUSTÍVEL	-7%	-15%	-17%	-22%	-6%	-1%
PREÇO COMBUSTÍVEL	\$370	\$412	\$432	\$427	\$427	\$349
TOTAL CUSTOS	-7%	-4%	-6%	-5%	-5%	-3%

Fonte: Autor.

5.3.1. Mês 01

Quando da declaração de volumes pelos embarcadores, era esperado para o mês 01 em estudo volumes em linha com os demais meses. No entanto, devido a mudanças no mercado internacional, diversos embarcadores com contrato de afretamento de longo prazo (COA) reduziram consideravelmente seus volumes. No mesmo sentido, houve uma grande redução em cargas *spot* disponíveis. Além disso, os poucos pedidos de contrato (COA) que foram solicitados eram de portos com pouco calado, o que conseqüentemente forçou a alocação de navios empregados na linha, apesar de não ter pedidos para otimizar a capacidade dessas embarcações.

Dos três navios disponíveis, o primeiro a abrir no sistema era o de maior capacidade e com maior custo operacional diário quando comparado aos demais navios alocados no mês 01. Com isso, os programadores decidiram levar o máximo de carga nesse navio para os pedidos operados em portos com calado profundo. Essa estratégia era em linha com a expectativa dos programadores de melhoria do mercado para o final do horizonte de planejamento. No entanto, tal mudança de mercado não aconteceu.

Quando comparada à capacidade ocupada dos três navios alocados no mês 01, percebe-se que na programação real a ocupação de cada navio foi de 98%, 86% e 70%, por ordem de início no sistema, respectivamente. A ferramenta de apoio decisão apresentou uma roteirização mais balanceada, sendo a respectiva ocupação

de navio em 85%, 100% e 74%. Assim, o modelo matemático, ao contrário dos programadores, decidiu por fazer a rota mais curta para o maior e mais caro navio, o primeiro disponível no sistema, evitando os portos mais profundos.

O modelo matemático consolidou dois pedidos com destino para Onsan (Coréia do Sul) em um único navio. Tal decisão não aconteceu na realidade pois um dos pedidos para Onsan foi realizado após o embarque do outro pedido para esse destino. Assim, impossibilitando a combinação e a otimização da alocação dos navios.

Os resultados apresentados mostram o impacto da expectativa de mercado futuro perante os programadores. Assim, em busca de otimizar a capacidade de todos os navios, os programadores podem, na verdade, fazer uma alocação com custos mais altos do que a solução ótima. No caso do mês 01, o maior navio deveria seguir a menor rota. Essa conclusão foi considerada uma grande quebra de paradigma para os profissionais que validaram tais resultados, habituados ao contrário.

5.3.2. Mês 03

O mês 03 teve o maior preço de combustível quando comparado aos demais meses do estudo. Seja no modelo ou na programação real, o custo de combustível para o mês 03 correspondeu a 36,5% dos custos totais. Tal valor é maior do que a média dos demais meses em estudo que foi de 33,3%.

Focados em otimizar os navios, os programadores decidiram carregar todos os navios no porto onde iniciaram no sistema e dois dos navios somente carregaram em único porto. Já no modelo matemático, somente 5 dos 6 navios carregaram no porto inicial do sistema e todos os navios operaram em mais de um porto de carregamento.

Essa decisão dos programadores é razoável devido à redução das milhas percorridas e dos custos portuários. No entanto, por falta de um ferramental que capture todas as opções, os programadores não conseguem visualizar que uma maior navegação na região do carregamento pode salvar milhas entre os portos de descarga ao combinar pedidos com o mesmo destino.

Devido à empresa em estudo trabalhar com instruções de velocidade padrão, raramente os programadores avaliam alterar as instruções de velocidade para determinados trechos visando ganhos em custos de combustível. A ferramenta de decisão é capaz de informar a instrução ótima trecho a trecho. Com isso, no modelo matemático, o navio com menor consumo de combustível por dia teve a rota 13% maior em milhas náuticas do que a da programação real. O navio menos eficiente, com maior consumo de combustível por dia, teve a rota 12% menor em milhas náuticas do que o realizado.

Em um contexto de preço de combustível elevado, o modelo matemático alocou mais chamadas portuárias na região de carregamento, desafiando premissas de otimização dos programadores, como de não carregar no porto inicial do sistema, a fim de combinar portos na descarga, diminuindo as milhas percorridas e, conseqüentemente, o consumo total de combustível. Além disso, o modelo buscou a eficiência de consumo das embarcações para redução dos custos.

5.3.3. Mês 02 e 04

A discussões acima referente aos meses 01e 03 se repetem para todos os demais casos estudados. No mês 02 foram alocados 6 navios, sendo 4 navios com mesma capacidade e custos. As outras duas embarcações, com capacidade e custo operacional diário menor.

Em linha com a discussão do mês 01, os primeiros navios a abrir no mês 04 eram os de maior capacidade e custos. Com isso, os programadores mantiveram tais navios por grande período na costa de carregamento visando otimizar a capacidade. Conforme abordado para o mês 03, os programadores não alteraram a instrução padrão de velocidade, que era *Eco Speed*. Já o ferramental alocou para todos os navios em todos os trechos a instrução de velocidade *Super Eco Speed*. Apesar de ser uma instrução de velocidade mais lenta e que leva maior duração da viagem, os ganhos em consumo de combustível foram mais expressivos que o aumento no custo operacional diário.

O porto de Changshu pode ser considerado um dos principais portos da linha por ser destino de grande parte dos volumes embarcados. Tal porto é também um

dos principais portos de carregamento para as linhas que saem da China. Além disso, é um porto restritivo em calado. Com isso, os programadores usualmente associam um porto mais profundo e Changshu como último porto da viagem. O modelo, por outro lado, teve apenas metade dos navios para tal porto. Quando da validação dos resultados do modelo matemático, os programadores validaram os portos finais como igualmente oportunos para cargas. Bem como, percebeu-se que o modelo utilizou os limites que o calado de Changshu permitem para reduzir ao máximo o número de navios nesse porto.

Em relação ao posicionamento de navios, os programadores costumam ter como último porto de descarga potenciais portos de carregamento, usualmente localizados na região central a norte da China. Ao buscar otimizar as rotas, o modelo matemático fez com que dois navios do mês 04 terminassem na região sul da China, que é pouco atrativa para cargas. Segundo os programadores vale o estudo sobre essa estratégia pois potencialmente pode ser um menor custo para a empresa como um todo navegar com o navio vazio até o primeiro porto de carregamento no Oriente.

Ainda sobre o mês 04, dentre os muitos pedidos tinha-se pouca possibilidade de combinação de portos de descarga. Com isso, metade dos navios carregaram em somente um porto de carregamento. Tal condição é oposta ao mês 03 quando se tinha tais possibilidades de combinação de portos na Ásia.

Os meses 05 e 06 são variações semelhantes à dos meses apresentados anteriormente: instruções de velocidades por trecho diferentes da instrução padrão; combinação de portos na descarga; mudanças em pedidos realizados pelos clientes no decorrer do horizonte de planejamento; alocação dos navios com custos operacionais diário nas menores rotas apesar de subutilizar a capacidade máximas dessas embarcações, etc.

Além das reduções de custos, os resultados apresentados desafiam conceitos utilizados pelos programadores para a preparação manual das rotas dos navios.

6 Conclusão

Diante do cenário que grande parte da movimentação de carga pelo mundo acontece pelo modal marítimo, tem-se, nesse grande setor, um nicho operacional denominado *tramp*, no qual os navios se comportam como um táxi, ou seja, atrás das melhores oportunidades de carga e faturamento. Os armadores *tramp* enfrentam, nos últimos anos, dificuldade de aumento no preço dos fretes praticados, dentre vários motivos, devido ao desbalanceamento entre oferta de navios e demanda de carga. Com isso, torna-se fundamental buscar oportunidades de redução de custos. A otimização do roteamento e programação de navios, usualmente feita de maneira manual por experientes programadores nessas organizações, vem cada vez mais sendo explorada pela literatura acadêmica, ajudando os armadores a aumentarem suas margens.

Assim, torna-se relevante uma ferramenta de apoio à tomada de decisão para o roteamento e programação dos navios, em um setor em que os volumes e custos são de grande relevância e, logo, tem-se um grande impacto tais decisões de planejamento. A ferramenta, composta pela planilha de gestão de base de dados (variáveis, conjuntos e parâmetros) alimenta um modelo matemático que é processado através da linguagem de programação Julia e o otimizador Gurobi.

Destaca-se que o modelo é baseado no trabalho de Korsivk *et al.* (2011), mostra-se eficaz ao gerar programações viáveis e com redução de custos totais entre 3% e 7%, quando comparado com a programação real feita pelos profissionais em seis distintos cenários de horizonte de 30-45 dias em um armador de cargas *Break-bulk* que opera no modelo *tramp*.

Em linha com o intuito de ser uma ferramenta de apoio à decisão, a função dos programadores de revisão e discussão dos resultados gerados pelo modelo matemático é fundamental para sua validação e melhoria. Devido aos resultados satisfatórios do ferramental, espera-se expandir sua aplicação para outros meses, bem como utilizá-lo no decorrer do horizonte de análise para capturar mais os fechamentos *spot*.

Contribui-se assim para a literatura acadêmica com a expansão da temática de otimização do roteamento e programação de navios, especificamente para aqueles que operam no modelo *tramp* e estão expostos às muitas variáveis de mercado. O trabalho é aplicado a um armador de relevância do setor e entrega resultados satisfatórios. Destacam-se as discussões entre a lógica e os paradigmas utilizados pelos programadores durante o horizonte de planejamento e as alocações sub-ótimas quando comparadas com os resultados da ferramenta proposta.

6.1. Trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento desse trabalho foi possível perceber que a organização em estudo tem inúmeras oportunidades de inovação e emprego de novas tecnologias já estudadas na literatura acadêmica para o roteamento e programação de navios visando à redução de custos e melhoria no atendimento de seus clientes. De igual maneira, detalhes da operação da organização estudada podem ser ainda mais explorados pela comunidade acadêmica, gerando conhecimento e tecnologias.

A seguir são apresentadas algumas oportunidades de pesquisas futuras:

- Incluir restrições específicas de carga *spot*, de caráter opcional, para tomada de decisão, se viáveis ou não, a serem tomadas durante o horizonte de planejamento;
- Utilizar pesquisas que apontem a relação entre velocidade e consumo de combustível como uma função contínua, ao invés de níveis discretos de velocidade e consumo de combustível utilizados nesse trabalho;
- Adicionar à pesquisa atual questões relativas à sustentabilidade, como redução do impacto social e ambiental, já em linha com crescentes preocupações do setor para tais temáticas;
- Expandir a resolução atual para um horizonte maior de planejamento, em linha com a “Declaração de Volume” dos clientes que projetam até noventa dias de planejamento ou até mesmo para um período orçamentário de um ano;

- Incluir outras linhas para o roteamento de um grupo de navios, englobando assim o aspecto tático (os portos e volumes de cada navio) e estratégico (alocação dos navios nas linhas), que hoje é feito de maneira empírica;
- Adicionar incertezas no modelo proposto, como regimes de chuva que são sazonais e afetam a produtividade nos portos, variação no preço do combustível e incertezas relacionadas ao custo operacional diário, associado a indicadores de mercado para cada linha e tipo de navio.
- Utilizar de métodos exatos como *Branch, cut and price*, em crescente utilização na literatura acadêmica de roteamento e programação de navios *tramp* para resolução do caso real trabalhado nessa dissertação.

7

Referências bibliográficas

APPELGREN, L. **A column generation algorithm for a ship scheduling problem**. Transportation Science, n.3, p. 53–68, 1969.

AL-KHAYYAL, F., HWANG, S.-J. **Inventory constrained maritime routing and scheduling for multi-commodity liquid bulk**, Part I: Applications and model. European Journal of Operational Research 176, 106–130, 2007.

BAUSCH, D. O.; BROWN, G. G.; RONEN, D. **Scheduling short-term marine transport of bulk products**. Maritime Policy and Management, v.5, n.4, p 335- 348, 1998.

BELTRAMIN, A. **Modern Branch-and-Cut solvers for Mixed-Integer Linear Programming: a computational comparison**. 2015.

BIMCO. **Laytime Definitions for Charter Parties 2013**. Disponível em: <<https://www.bimco.org/contracts-and-clauses/bimco-contracts/laytime-definitions-for-charter-parties-2013>> Acesso em 01 ago 2019.

BORTHEN, T., LOENNECHEN, H., WANG, X., FAGERHOLT, K., VIDAL, T. **A genetic search-based heuristic for a fleet size and periodic routing problem with application to offshore supply planning**. EURO Journal on Transportation and Logistics, 2017.

BREMER, W. M.; PERAKIS, A. N. **An operational tanker scheduling optimization system: Model implementation, results and possible extensions**. Maritime Policy and Management, v.19, n.3, p.189–199, 1992.

BROWN, G. G.; GRAVES, G. W.; RONEN. D. **Scheduling ocean transportation of crude oil**. *Management Science*, v.33, n.3, p. 335–346, 1987.

BRØNMO, G., CHRISTIANSEN, M., & NYGREEN, B. **Ship routing and scheduling with flexible cargo sizes**. *Journal of the Operational Research Society*, 58(9), 1167-1177. doi:10.1057/palgrave.jors.2602263, 2007.

CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; NYGREEN, B.; RONEN, D. **Ship routing and scheduling in the new millennium**. *European Journal of Operational Research*, v. 228, n. 3, p. 467-483, 2013.

CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; RONEN D. **Ship routing and scheduling: Status and perspectives**. *Transportation Science*, v. 38, n. 1, p. 1-18, 2004.

DILLENBERGER, C.; ESCUDERO, L.; WOLLENSAK, A; ZHANG, WU. **On practical resource allocation for production planning and scheduling with period overlapping setups**. *European Journal of Operational Research*, v. 75, n. 2, p. 275-286, 1994.

COŞAR, A. K., DEMIR, B. **Shipping inside the box: Containerization and trade**, *Journal of International Economics*, Volume 114, Pages 331-345, ISSN 0022-1996, <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2018.07.008>, 2018

DIZ, G.S.S. **Proposta de um sistema de suporte à decisão para programação de navios baseado em otimização: um caso prático**. Rio de Janeiro. 89p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

DUNNING, I., HUCHETTE, J., LUBIN, M. **JuMP: A modeling language for mathematical optimization**. arXiv preprint arXiv:1508.01982, 2015.

EASTERNBULK. **Semi Open box design**. Disponível em: <<http://easternbulk.com/fleet/semi-open-box-design/>>. Acesso em 25 ago 2019

FAGERHOLT, K. **A computer-based decision support system for vessel fleet scheduling—experience and future research**. *Decis Supp Syst* 37:35–47, 2004.

FAGERHOLT, K.; CHRISTIANSEN, M. **A travelling salesman problem with allocation, time window and precedence constraints – an application to ship scheduling**. *International Transactions in Operational Research*, v.7, p.231- 244, 2000.

FAGERHOLT, K.; LINDSTAD, H. **TurboRouter: An Interactive Optimization-Based Decision Support System for Ship Routing and Scheduling**. *Maritime Economics & Logistics*, v.9, p.214–233, 2007.

FAGERHOLT, K., CHRISTIANSEN, M., MAGNUS HVATTUM, L., JOHNSEN, T. A. V., & VABØ, T. J. **A decision support methodology for strategic planning in maritime transportation**. *Omega*, 38(6), 465-474. doi:10.1016/j.omega.2009.12.003, 2010.

FAGERHOLT, K., HVATTUM, L. M., JOHNSEN, T. A. V., & KORSVIK, J. E. **Routing and scheduling in project shipping**. *Annals of Operations Research*, 207(1), 67-81. doi:10.1007/s10479-011-0888-1, 2013.

FLOOD, M. F. **Application of Transportation Theory to Scheduling a Military Tanker Fleet**, *Journal of the Operations Research Society of America*, v.2, n.2, p.150-162, 1954

FURMAN, K. C.; SONG, J.; KOCIS, G. R.; MCDONALD, M.K.; WARRICK, P.H. **Feedstock Routing in the ExxonMobil Downstream Sector**. *Interfaces*, v.41, n.2,p. 149-163, 2011.

GATICA, R. A., & MIRANDA, P. A. **Special issue on latin-american research: A time based discretization approach for ship routing and scheduling with variable speed**. Networks and Spatial Economics, 11(3), 465-485. doi:10.1007/s11067-010-9132-9, 2011.

GRONHAUG, R.; CHRISTIANSEN, M.; DESAULNIERS, G.; DESROSIER, J. **A Branch-and-Price Method for a Liquefied Natural Gas Inventory Routing Problem**. Transportation Science, v.44, n.3, p.400–415 , 2010.

HEMMATI, A., HVATTUM, L. M., FAGERHOLT, K., & NORSTAD, I. **Benchmark suite for industrial and tramp ship routing and scheduling problems**. INFOR, 52(1), 28-38. doi:10.3138/infor.52.1.28 2014.

HEMMATI, A., STÅLHANE, M., HVATTUM, L. M., & ANDERSSON, H. **An effective heuristic for solving a combined cargo and inventory routing problem in tramp shipping**. Computers and Operations Research, 64, 274-282. doi:10.1016/j.cor.2015.06.011, 2015.

HOMAYOUNI, S. M., & FONTES, DALILA B.M.M. **Metaheuristics for Maritime Operations**, First Edition. Published by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-1-78630-280-9, 2018.

HOMSI, G., MARTINELLI, R., VIDAL, T. AND FAGERHOLT, K. **Industrial and Tramp Ship Routing Problems: Closing the Gap for Real-Scale Instances**. arXiv preprint arXiv:1809.10584, 2018.

KANG, K., ZHANG, W. -, GUO, L. -, & MA, T. **Research on ship routing and deployment mode for a bulk**. Paper presented at the International Conference on Management Science and Engineering - Annual Conference Proceedings, 1832-1837. doi:10.1109/ICMSE.2012.6414421, 2012.

KIM, S.; LEE, K. **An Optimization-based Decision Support System for Ship Scheduling**. Computers Industrial Engineering, v.33,n.3-4, p.689-692, 1997.

KORSVIK, J. E., FAGERHOLT, K., & LAPORTE, G. **A tabu search heuristic for ship routing and scheduling**. Journal of the Operational Research Society, 61(4), 594-603. doi:10.1057/jors.2008.192, 2010.

KORSVIK, J. E., FAGERHOLT, K., & LAPORTE, G. **A large neighborhood search heuristic for Ship Routing and Scheduling with Split Loads**. Computers & Operations Research 38: 474-483, 2011.

LAWRENCE S. **International sea transport: the years ahead**. Lexington: Lexington Books, 1972.

LIN, D. -, & LIU, H. -. **Combined ship allocation, routing and freight assignment in tramp shipping**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 47(4), 414-431. doi:10.1016/j.tre.2010.12.003, 2011.

MALAGUTI E., MARTELLO, S., SANTINI,A. **The traveling salesman problem with pickups, deliveries, and draft limits**, Omega, Volume 74, Pages 50-58, ISSN 0305-0483, <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.01.005.>, 2018.

MALLIAPPI, F., BENNELL, J. A., POTTS, C. N. **A variable neighborhood search heuristic for tramp ship scheduling** in: Böse J.W., Hu H., Jahn C., Shi X., Stahlbock R., Voß S. (eds) Computational Logistics. ICCL 2011. Lecture Notes in Computer Science, vol 6971. Springer, Berlin, Heidelberg doi:10.1007/978-3-642-24264-9_21, 2011.

NORSTAD, I., FAGERHOLT, K., & LAPORTE, G. **Tramp ship routing and scheduling with speed optimization**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 19(5), 853-865. doi:10.1016/j.trc.2010.05.001, 2010.

NOTTEBOOM, T.E, VERNIMMEN, B. **The effect of high fuel costs on liner service configuration in container shipping.** Journal of Transport Geography, 17(5):325-337, 2009.

O'NEIL, R. J. **Exact Methods for Solving Single-Vehicle Pickup and Delivery Problems in Real Time.** 2018. Tese de Doutorado. George Mason University.

OILMONSTER. **Bunker Fuel Prices.** Disponível em: <<https://www.oilmonster.com/bunker-fuel-prices/>>. Acesso em 27 ago 2019

OPENSEA. **Ship types and sizes.** Disponível em: <<https://opensea.pro/blog/ships-types-and-sizes>>. Acesso em: 15 ago 2019.

PERAKIS, A. N.; BREMER, W. M. **An operational tanker scheduling optimization system: Background, current practice and model formulation.** Maritime Policy Management, v.19, n.3, p. 177-187, 1992.

PLOMARITOU, E., PAPADOPOULOS, A. **Shipbroking and Chartering Practice.** London: Informa Law from Routledge, <https://doi.org/10.4324/9781315689609>, 2018.

PSARAFTIS, H. **Ship routing and scheduling: the cart before the horse conjecture.** Maritime economics and logistics. 1-14. 10.1057/S41278-017-0080-X, 2017.

PSARAFTIS, H. **A Dynamic Programming Solution to the Single Vehicle Many-to-Many Immediate Request Dial-a-Ride Problem.** Transportation Science. 14. 130-154. 10.1287/trsc.14.2.130, 1980.

ROWBOTHAM, J. M. **Introduction to marine cargo.** Second edition. - Abingdon, UK : Informa, 2014. - 413 p. : ill. ; 24 cm. - Lloyd's practical shipping guides . ISBN: 9780415732413 (pbk.).LCCN:2013034741, 2014.

RONEN, D. **Cargo ships routing and scheduling: Survey of models and problems**. European Journal of Operational Research, 12(2), 119-126. doi:10.1016/0377-2217(83)90215-1, 1983.

RONEN, D. **Ship scheduling: The last decade**. European Journal of Operational Research, v.71, p.325-333, 1993.

STÅLHANE, M., ANDERSSON, H., CHRISTIANSEN, M., & FAGERHOLT, K. **Vendor managed inventory in tramp shipping**. Omega (United Kingdom), 47, 60-72. doi:10.1016/j.omega.2014.03.004, 2014.

TROTTIER, L.P., CORDEAU, J.F. **Solving the vessel routing and scheduling problem at a Canadian maritime transportation company**, INFOR: Information Systems and Operational Research, DOI: 10.1080/03155986.2018.1533213, 2019.

UNCTAD. **Review of Maritime Transport (2018)**. United Nations publication. Sales No. E.18 II.D.5. New York and Geneva, 2018.

VILHELMSSEN, C., LUSBY, R. M., & LARSEN, J. **Tramp ship routing and scheduling with voyage separation requirements**. OR Spectrum, 39(4), 913-943. doi:10.1007/s00291-017-0480-4, 2017.

WANG, S., GAO, S., TAN, T., YANG, W. **Bunker fuel cost and freight revenue optimization for a single liner shipping service**, Computers & Operations Research, Volume 111, Pages 67-83, ISSN 0305-0548, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.06.003>, 2019.

WEN, M., ROPKE, S., PETERSEN, H. L., LARSEN, R., & MADSEN, O. B. G. **Full-shipload tramp ship routing and scheduling with variable speeds**. Computers and Operations Research, 70, 1-8. doi:10.1016/j.cor.2015.10.002, 2016.

YE, Y.; LIANG, S.; ZHU, Y. **A mixed-integer linear programming-based scheduling model for refined-oil shipping.** Computers & Chemical Engineering, v. 99, p. 106-116, 2017.

Apêndice A

Segue um exemplo do código em linguagem de programação Julia utilizado no trabalho:

```
cd("C:\\Users\\lucas.louzada\\Dropbox\\Ship Routing\\Julia - Evolution\\Monthly\\02-19")

using JuMP
using Gurobi
using DataFrames
using CSV
using MathOptFormat

# ===== Parâmetros do Problema ===== #
D = CSV.read("Distance.csv", header = false);
Q = CSV.read("Capacity.csv", header = false);
CP= CSV.read("Custo Portuario.csv", header = false);
CD= CSV.read("Custo Diario.csv", header = false);
Prod= CSV.read("Produtividade.csv", header = false);
S= CSV.read("Velocidade.csv", header = false);
CC= CSV.read("Consumo Combustivel.csv", header = false);
TT= CSV.read("Transit Time.csv", header = false);
LE= CSV.read("LE.csv", header = false);
LB= CSV.read("LB.csv", header = false);

K=collect(1:2); #numero de navios
R=collect(1:6); #numero de pedidos
V=collect(1:3); #qtd tipos velocidades
M1=75000; #M grande capacidade
M2=150; #M grande tempo
c=5 # Cingapura
BP=400;#Preço Combustivel por ton
N=collect(1:10); #singapura + no artificial – total de portos
F=length(N);
Nc=N[1:c-1]; # portos de carregamento
Nd=N[c+1:end-1]; # portos de descarga excluindo porto artificial

Ol=[1 1 2 3 3 4];
Od=[6 8 9 6 7 8];
Oq=[2000 8000 30000 50000 20000 8000];
Ri=[[1 2],[3],[4 5],[6],[1 4],[5],[2 6],[3],[]];
Z=[1 20];
O=[3 3];

# ===== Problema Navio ===== #
NavioProb=Model(with_optimizer(Gurobi.Optimizer))
```

```

#NavioProb=Model(with_optimizer(Gurobi.Optimizer, TimeLimit = 200))
# ===== Variáveis de Decisão ===== #
@variable(NavioProb,x[N,N,K], Bin); #1 caso o navio k percorra os nós i e j
@variable(NavioProb,z[N,K,R]>=0); #quantidade de carga carregado do pedido r
carregada no porto i a bordo do navio k
@variable(NavioProb,y[R,K], Bin); #1 caso o pedido r seja atendido no navio k
@variable(NavioProb,w[N,K]>=0); #quantidade de carga após o navio k sair do porto i
@variable(NavioProb,s[N,N,K,V],Bin); #1 caso seja a velocidade do tipo V entre os
trechos
@variable(NavioProb,t[N,K]>=0); #Marcação do tempo
# ===== Restrições ===== #

#O navio só pode sair uma vez do porto.
@constraint(NavioProb, Rest1[j in N, k in K], sum(x[i, j, k] for i in N) <= 1);
#O navio só pode chegar uma vez no porto.
@constraint(NavioProb, Rest1A[i in N, k in K], sum(x[i, j, k] for j in N) <= 1);
#Conservação de fluxo do navio.
@constraint(NavioProb, Rest1B[i in N, k in K; i != O[k] && i != F], sum(x[j, i, k] for j in
N) - sum(x[i, j, k] for j in N) == 0);
#Garantir que toda carga é transportada:
#@constraint(NavioProb,Rest2[i in Nc],sum(x[i,j,k] for k in K, j in N)>=1);
#Garantir que todo navio inicie do ponto inicial
@constraint(NavioProb,Rest3[k in K],sum(x[O[k],j,k] for j in Nc)==1);
#Garantir o fluxo entre i e j
@constraint(NavioProb,Rest4[k in K,i in N, j in N], x[i,j,k] + x[j,i,k] <= 1);
#Garantir que todo navio comece com zero de carga a bordo
@constraint(NavioProb,Rest5[k in K],w[O[k],k]==sum(z[O[k],k,r] for r in Ri[O[k]]));
#Garantir que todo navio termine com zero de carga a bordo
@constraint(NavioProb,Rest6[k in K],w[F,k]==0);
#Garantir que volume carregado não exceda a capacidade dos navios - carregamento
@constraint(NavioProb,Rest7[i in N[1:c], k in K], w[i,k] <= Q[i,k]);
#Garantir que volume carregado não exceda a capacidade dos navios – descarga
@constraint(NavioProb,Rest7A[i in Nd, k in K], w[i,k] + sum(z[i,k,r] for r in Ri[i]) <=
Q[i,k]);
#O navio não pode ir de carregamento direto para descarregamento sem passar por
Cingapura
@constraint(NavioProb, Rest9[i in Nc, j in Nd, k in K], x[i, j, k] == 0);
#O navio não pode voltar de descarregamento para carregamento
@constraint(NavioProb, Rest9A[i in Nd, j in Nc, k in K], x[i, j, k] == 0);
#Garantir que todas a viagens passem por Cingapura
@constraint(NavioProb,Rest10[k in K],sum(x[i,c,k] for i in Nc)==1);
@constraint(NavioProb,Rest10A[k in K],sum(x[c,j,k] for j in Nd)==1);
#Garantir que todas a viagens terminem no ponto artificial F
@constraint(NavioProb,Rest11[k in K],sum(x[i,F,k] for i in Nd)==1);
@constraint(NavioProb,Rest11A[k in K],sum(x[F,i,k] for i in N)==0);
#Garantir que todos os pedidos tenham um navio alocado
@constraint(NavioProb,Rest12[r in R],sum(y[r,k] for k in K)>=1);
#Garantir que o navio carrega no porto de cada pedido alocado
@constraint(NavioProb,Rest13[k in K, r in R],sum(x[Ol[r],j,k] for j in N[1:c]) >= y[r,k]);
#Garantir que o navio descarregue no porto de cada pedido alocado
@constraint(NavioProb,Rest14[k in K, r in R],sum(x[Od[r],j,k] for j in N[c+1:F]) >=
y[r,k]);
#Garantir que toda quantidade dos pedidos seja carregada
@constraint(NavioProb,Rest15[r in R],sum(z[Ol[r],k,r] for k in K)==Oq[r]);
@constraint(NavioProb,Rest15A[r in R, k in K], z[Ol[r],k,r] <= Oq[r]*y[r,k]);

```

```

@constraint(NavioProb,Rest15B[r in R, k in K], z[Ol[r],k,r] >= 100*y[r,k]);
#Garantir que toda quantidade dos pedidos seja descarregada
@constraint(NavioProb,Rest16[r in R],sum(z[Od[r],k,r] for k in K)==Oq[r]);
@constraint(NavioProb,Rest16A[r in R, k in K], z[Od[r],k,r]<= Oq[r]*y[r,k]);
#Garantir fluxo e as quantidades no nós de carregamento
@constraint(NavioProb,Rest17A[k in K, i in Nc], w[i,k] <= M1*sum(x[i,j,k] for j in
N[1:c]));
@constraint(NavioProb,Rest17B[k in K,i in Nc], w[i,k] >= -M1*sum(x[i,j,k] for j in
N[1:c]));
@constraint(NavioProb,Rest17C[k in K,i in Nc,j in N[1:c]; j!=O[k]], w[j,k] >= w[i,k] -
(M1*(1-x[i,j,k]))+ sum(z[j,k,r] for r in Ri[j]));
@constraint(NavioProb,Rest17D[k in K,i in Nc,j in N[1:c]; j!=O[k]], w[j,k] <= w[i,k] +
(M1*(1-x[i,j,k])) + sum(z[j,k,r] for r in Ri[j]));
#Garantir fluxo e as quantidades no nós de descarga
@constraint(NavioProb,Rest18A[k in K, j in N[c+1:F]], w[j,k] >= -M1*sum(x[i,j,k] for i
in N[c:end-1]));
@constraint(NavioProb,Rest18B[k in K, j in N[c+1:F]], w[j,k] <= M1*sum(x[i,j,k] for i in
N[c:end-1]));
@constraint(NavioProb,Rest18C[k in K, i in N[c:end-1],j in N[c+1:F]], w[j,k] >= w[i,k] -
M1*(1-x[i,j,k]) - sum(z[j,k,r] for r in Ri[j]));
@constraint(NavioProb,Rest18D[k in K, i in N[c:end-1],j in N[c+1:F]], w[j,k] <= w[i,k] +
M1*(1-x[i,j,k]) - sum(z[j,k,r] for r in Ri[j]));
#A quantidade carregada deve ser igual à descarregada.
@constraint(NavioProb, Rest19[k in K, r in R], z[Ol[r], k, r] == z[Od[r], k, r]);
#Velocidades
@constraint(NavioProb,Rest20[k in K,i in N,j in N], sum(s[i,j,k,v] for v in V) == x[i,j,k]);
#Duração
@constraint(NavioProb,Rest21A[k in K], t[O[k],k] >= Z[k]);
@constraint(NavioProb,Rest21B[k in K, i in N[1:F-1]], t[i,k] >= -M2*sum(x[i,j,k] for j in
N));
@constraint(NavioProb,Rest21C[k in K, i in N[1:F-1]], t[i,k] <= M2*sum(x[i,j,k] for j in
N));
@constraint(NavioProb,Rest21D[i in Nc,j in N[1:c], k in K; i!=j], t[j,k] >= t[i,k] - M2*(1-
x[i,j,k])+ (sum((s[i,j,k,v]*D[i,j]/(24*S[k,v])) for v in V))+sum(z[i,k,r] for r in
Ri[i])/Prod[i,1]));
@constraint(NavioProb,Rest21E[i in N[c:F-1],j in N[c+1:F], k in K; i!=j], t[j,k] >= t[i,k] -
M2*(1-x[i,j,k])+ (sum((s[i,j,k,v]*D[i,j]/(24*S[k,v])) for v in V))+sum(z[i,k,r] for r in
Ri[i])/Prod[i,1]));
@constraint(NavioProb,Rest21F[i in N[c:F-1],j in N[c+1:F], k in K; i!=j], t[j,k] <=
t[i,k]+M2*(1-x[i,j,k])+ (sum((s[i,j,k,v]*D[i,j]/(24*S[k,v])) for v in V))+sum(z[i,k,r] for r
in Ri[i])/Prod[i,1]));
#@constraint(NavioProb,Rest21G[k in K], t[F,k] >= t[c,k]);
#Janela de Chegada no Carregamento
@constraint(NavioProb,Rest22A[k in K, r in R], t[Ol[r],k]<=LE[r,1]+M2*(1-y[r,k]));
@constraint(NavioProb,Rest22B[k in K, r in R], t[Ol[r],k]>=LB[r,1]-M2*(1-y[r,k]));
#Transit Time
@constraint(NavioProb,Rest23[k in K, r in R], t[Od[r],k] <= t[Ol[r],k]+ TT[r,1] +
))+sum(z[i,k,r] for r in Ri[i])/Prod[i,1]) +M2*(1-y[r,k]));

# ===== Função Objetivo ===== #
@objective(NavioProb,Min, (sum(x[i,j,k]*CP[i,1] for i in Nc, j in N[1:c], k in K))
+(sum(x[i,j,k]*CP[i,1] for i in N[c:end-1], j in N[c+1:F], k in K)) +
(sum((s[i,j,k,v]*D[i,j]*CC[k,v])/(24*S[k,v]) for v in V, i in Nc, j in N[1:c], k in K)*BP)+
(sum((s[i,j,k,v]*D[i,j]* CC[k,v])/(24*S[k,v]) for v in V, i in N[c:end-1], j in N[c+1:F], k in
K)*BP)+sum(((t[F,k]-Z[k])*CD[k,1]) for k in K));

```

```
lp_file = MathOptFormat.LP.Model()
MOI.copy_to(lp_file, backend(NavioProb))
MOI.write_to_file(lp_file, "my_model.lp")

status = optimize!(NavioProb)
OUT_Result = JuMP.objective_value(NavioProb)
```