LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
João Pessoa - PB, 3 a 5 de novembro de 2020

Matheurística para Problema de Roteamento Marítimo com Estoques

Nathalie Sanghikian
Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio, Brasil
Rua Marquês de São Vicente, 225, 950L – Gávea – Rio de Janeiro / RJ
nathaliesanghikian@aluno.puc-rio.br

Rafael Martinelli
Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio, Brasil
Rua Marquês de São Vicente, 225, 950L – Gávea – Rio de Janeiro / RJ
martinelli@puc-rio.br

RESUMO

No comércio marítimo global, o roteamento de navios é parte essencial da integração e otimização da cadeia de suprimentos, sendo objeto de estudo de muitos autores. O *Maritime Inventory Routing Problem* (MIRP) envolve um elevado número de variáveis e é considerado um problema computacionalmente complexo de ser resolvido. A busca por soluções de alta qualidade em menores tempos de processamento é uma das motivações deste trabalho. Realizou-se uma revisão de literatura sobre métodos heurísticos e metaheurísticos que, nos últimos anos, são aplicados para a resolução do MIRP, e desenvolveu-se uma metaheurística auxiliada por um modelo matemático de programação linear. Esta abordagem foi aplicada na resolução de um caso real de roteamento de navios de uma importante empresa do setor de Óleo & Gás, capaz de gerar resultados satisfatórios, com violações de estoque baixas e pontuais, boa utilização média dos navios e em um tempo computacional aceitável.

PALAVRAS CHAVE. Roteamento Marítimo com Estoques, Metaheurística, Programação Linear.

Tópicos: OC – Otimização Combinatória, EN&PG – PO na Área de Energia, Petróleo e Gás

ABSTRACT

In global maritime trade, ship routing is an essential part of supply chain integration and optimization and is the object of study by many authors. The Maritime Inventory Routing Problem (MIRP) involves many variables and, therefore, is considered a computationally complex problem to be solved. The search for high-quality solutions in shorter processing times is one of the motivations of this work. A literature review was carried out on heuristic and metaheuristic methods that, in recent years, have been applied to the resolution of MIRP. A metaheuristic has been developed assisted by a mathematical model of linear programming. This approach was applied in the resolution of a ship routing case of an essential company in the Oil & Gas sector, capable of generating satisfactory results, low and punctual stock violations, good average ship occupation, and in acceptable computational time.

KEYWORDS. Maritime Inventory Routing, Metaheuristics, Linear Programming.

Paper topics: CO – Combinatorial Optimization, OR&OG – OR in Energy, Oil & Gas

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

1. Introdução

Refletindo a evolução da economia mundial e da atividade comercial, o comércio marítimo internacional perdeu força em 2018: os volumes cresceram 2,7% em 2018, abaixo dos 4,1% em 2017. A desaceleração foi ampla e afetou quase todos os segmentos de carga marítima [UNCTAD, 2019]. Em face desta situação, somada ao acirramento da competição do mercado, cada vez mais se faz necessária, em todas as áreas, a existência de uma cadeia de suprimentos integrada e otimizada, garantindo menores custos e maior eficiência nos processos. Neste cenário, destaca-se a importância de um roteamento adequado destes navios para garantir a eficiência da utilização da frota marítima, com atendimento de prazos e custos competitivos [Christiansen e Fagerholt, 2009].

Mesmo com a desaceleração, entre 2017 e 2018, no comércio marítimo internacional, o petróleo e seus derivados representaram 29,4% da carga carregada e 31,1% da carga descarregada no mundo [UNCTAD, 2019]. No Brasil, segundo anuário da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), em 2019 foram realizadas quase 65 mil atracações e movimentadas 1,104 bilhão de toneladas de produtos. Deste total, 224,7 milhões de toneladas são referentes ao setor de Petróleo e Derivados, um aumento de 11% em relação ao ano anterior. A exportação de óleo bruto cresceu 37% no período 2018-2019 e representa 61,2% dos granéis líquidos [ANTAQ, 2019].

Empresas do setor de óleo e gás são, em geral, responsáveis pela produção, refino e transporte de petróleo e derivados, como GLP, nafta, gasolina, querosene, diesel, óleos combustível. Assim, cabe às empresas a contratação de navios, bem como seu roteamento, de modo a atender às premissas inerentes ao processo, como, por exemplo, garantia de atendimento a demanda, prazos, manutenção de estoques, visando o menor custo possível. Nesta configuração, onde o operador dos navios também é o gestor dos estoques nos terminais, tem-se um problema conhecido como *Maritime Inventory Routing Problem* (MIRP). O problema de roteamento marítimo com estoques é uma combinação de problemas de roteamento e escalonamento de navios e de gerenciamento de estoque [Christiansen e Fagerholt, 2009]. O roteamento deve definir quais portos e em qual sequência os navios visitarão, respeitando limitações de calado e as capacidades dos navios. O tempo de cada viagem pode variar de dias a meses. O produto é produzido e armazenado em portos de carga e é transportado por via marítima para portos de descarga. O objetivo é encontrar rotas que minimizem os custos, de roteamento e de estoque, respeitando as restrições do problema, tais como limites superior e inferior dos estoques nos portos, as capacidades dos navios, calados, horizonte de tempo [Christiansen e Fagerholt, 2009; Costa, 2018].

Hoje, em uma grande empresa do setor de óleo e gás, a programação das rotas dos navios é feita empiricamente, baseada na experiência dos programadores. Buscando uma melhoria do processo de programação, está sendo implantado um sistema de roteamento dos navios cujas características, entretanto, dificultam o seu uso e a qualidade de sua solução. Os principais problemas identificados são a separação do modelo de otimização em duas etapas e a ausência do estoque inicial a bordo dos navios, ocasionando, consequentemente, perdas de informações relevantes, cenários inviáveis e a necessidade da atuação do programador sobre os resultados. Uma abordagem alternativa de uma única etapa foi estudada, considerando todas as variáveis relevantes ao sistema e eliminando a atuação do programador. Contudo, utilizando programação inteira, verificou-se a inviabilidade de resolução do modelo pelo tempo de processamento ser muito elevado. Alternativamente, o modelo foi estendido para a utilização de heurísticas de *relax-and-fix* e *fix-and-optimize* para obtenção de soluções boas em um menor tempo, mas ainda deixando crítica a sua utilização [Costa, 2018].

A metaheurística é uma das principais técnicas para resolução de problemas nos quais modelos de programação matemática não foram capazes de encontrar uma solução ótima. Essa

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

abordagem não garante a solução ótima, mas possivelmente uma solução viável de alta qualidade. É um método que fornece uma estrutura e diretrizes de estratégia gerais para desenvolvimento de um método heurístico específico ajustável a um determinado problema.

Assim, neste trabalho, o objetivo é desenvolver um método de resolução para o MIRP, que consiste em uma matheurística (metaheurística híbrida), onde é utilizada uma metaheurística de vizinhanças para roteamento de navios, assistida por um modelo matemático de programação linear para resolução do atendimento de estoque nos portos, com o foco no custo mínimo e em um tempo computacional aceitável.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta uma revisão de literatura sobre o tema de roteamento de navios com controle de estoques e métodos utilizados para sua resolução. Em seguida, a Seção 3 apresenta a metodologia da matheurística desenvolvida. A Seção 4 detalha o caso real onde foi aplicado o método e realiza uma análise dos resultados. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões e sugestões para próximos trabalhos.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Roteamento de Navios

É comum distinguir entre três modos principais de operação no transporte marítimo: *liner, tramp* e *industrial shipping*. O *liner shipping* é semelhante a um serviço de ônibus, onde horários e itinerários fixos devem ser seguidos. O transporte de contêineres pertence a este modo. No *tramp shipping*, o operador de transporte marítimo segue a disponibilidade de carga no mercado, transportando frequentemente uma mistura de carga obrigatória e opcional com o objetivo de maximizar o lucro. Já no caso do *industrial shipping*, o operador é o proprietário das cargas e controla a frota, tentando minimizar o custo do transporte de carga. No caso de petróleo, quase todo o transporte marítimo segue estes dois últimos modos de operação [Hemmati et al., 2014]. Baseado nesta distinção, o MIRP enquadra-se no modo de operação *industrial shipping*.

Christiansen e Fagerholt [2009] descrevem um MIRP básico e algumas de suas extensões. Para um caso básico, um único produto é transportado. As capacidades de armazenamento de inventário são dadas em todos os portos (de carga e descarga), além da taxa de produção e de consumo do produto (assumida constante durante o horizonte de planejamento). O número de atendimentos em um porto durante o período de planejamento não é pré-determinado, nem a quantidade a ser carregada ou descarregada em cada atendimento. É importante garantir que o nível de estoque nos portos (tanto de carga quanto de descarga) seja respeitado. Assim, o problema de planejamento é projetar rotas e programações que minimizem o custo de transporte sem interromper a produção ou o consumo. Não são assumidos custos de estoque e considera-se uma frota heterogênea de navios. Carga e descarga parciais são permitidas e o navio não está necessariamente vazio, podendo estar em um porto ou no mar no início do horizonte de planejamento.

Nos problemas de roteamento de navios, a maioria das aplicações reais são mais complexas que o caso básico. Pode haver um fornecedor/produtor ou consumidor central, restrições de estoque em apenas um dos portos, taxa de produção ou de consumo variável, múltiplos produtos, fretamentos *spot*, entre outras variações. Christiansen e Fagerholt [2009] fazem um breve levantamento de autores que abordaram essas variações em seus trabalhos. Essas extensões fazem do MIRP um problema computacionalmente muito difícil e, portanto, muito desafiador no que tange o desenvolvimento de métodos de solução.

Hemmati et al. [2014] e Homsi et al. [2020] alcançaram resultados notáveis ao proporem metaheurísticas para a resolução de problemas de transporte marítimos, ressaltando a aplicabilidade desse tipo de abordagem para solução de problemas complexos.

2.2. Métodos para solução de MIRP

Dauzère-Pérès et al. [2007] desenvolveram um sistema de apoio à decisão (do inglês, *Decision-Support System* – DSS) para roteamento para uma empresa fornecedora de pasta de carbonato de cálcio. O núcleo do DSS é um modelo de otimização que é resolvido por meio de uma metaheurística denominada algoritmo memético, também conhecido como busca genética local ou algoritmo genético híbrido. Ela combina uma heurística de busca local com operadores de cruzamento para explorar melhor o espaço da solução.

Christiansen et al. [2011] utilizaram uma heurística de construção incorporada em uma estrutura algorítmica genética para a resolução de um problema de MIRP com múltiplos produtos para indústria de cimento. A heurística de construção é determinística, mas tem parâmetros que podem ser variados para produzir planos diferentes. O algoritmo genético é usado para procurar parâmetros que produzam bons planos a partir da heurística de construção. O algoritmo de construção começa com um plano inicial, que normalmente implica em violações de restrições. A cada iteração, as violações são identificadas e busca-se adiá-las ou eliminá-las. Espera-se que o procedimento leve a um plano sem violações de capacidade. No entanto, o plano final também pode conter violações se em algum momento durante a construção for impossível encontrar uma solução que melhore a violação crítica. O algoritmo avalia as saídas de acordo com um número de critérios e escolhe aquele que maximiza uma soma ponderada das pontuações dos critérios. Os pesos usados nesta soma são os parâmetros que o algoritmo genético procura otimizar.

Siswanto et al. [2011] trabalharam com um problema de roteamento e programação de estoque de navios com compartimentos não-dedicados cujo objetivo era encontrar uma solução de custo mínimo enquanto satisfaz um número de restrições técnicas e físicas dentro de um determinado horizonte de planejamento. Para resolver este problema, desenvolveram um modelo de programação linear inteira mista, seguida de uma heurística gulosa de uma etapa e, com base nessa heurística, propuseram um conjunto de heurísticas para cada sub-problema (seleção de rota, seleção de navio, atividades de carga e descarga).

Song e Furman [2013] utilizaram métodos de solução que consistem em uma otimização baseada em um *large neighborhood search* e em um *branch-and-cut*. Uggen et al. [2013] usaram uma abordagem heurística estendida baseada em *relax-and-fix* para otimizar os problemas de roteamento de estoque marítimo.

Hemmati et al. [2016] consideraram um problema de roteamento de estoque de curta distância de vários produtos, no qual uma frota heterogênea de navios transporta vários produtos de locais de produção para locais de consumo em uma estrutura de tempo contínua. Foi proposta uma metaheurística híbrida iterativa de duas fases chamada *Hybrid Cargo Generating and Routing* (HCGR). Na primeira fase, o problema de roteamento de estoque é convertido em um problema de roteamento e escalonamento de navios, gerando cargas sujeitas a limites de estoque através do uso de programação matemática. Na segunda fase, uma *adaptive large neighborhood search* resolve o problema resultante de roteamento e programação de navios. A heurística HCGR modifica iterativamente as cargas geradas com base nas informações obtidas durante o processo.

Diz [2017] implementou uma abordagem de solução que combina as heurísticas *relax-and-fix* e *fix-and-optimize* em um cenário de duas fases. A fase *relax-and-fix* visa encontrar soluções viáveis enquanto a *fix-and-optimize* busca melhorar a solução obtida.

Papageorgiou et al. [2018] apresentaram um extenso estudo computacional de heurísticas que dependem de modelos de programação matemática para encontrar cronogramas de navios de alta qualidade e políticas para uma classe de problemas de roteamento de estoque marítimo. Compararam várias variantes de heurísticas de horizonte rolante, k-opt, ramificação local, polimento de

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

solução e seus híbridos.

Munguía et al. [2019] trabalharam com dois subproblemas MIP auxiliares derivados do problema que são iterativamente resolvidos para atingir uma primeira solução viável e para melhorá-la em relação ao objetivo original.

Bertazzi et al. [2019] formularam o MIRP como um modelo de programação linear inteiro misto e projetaram uma matheurística de três fases para resolver o problema. A primeira fase (fase de *clustering*) implementa a ideia de agrupar clientes em um conjunto de *clusters*. Na segunda fase (construção de roteamento), um conjunto de rotas é construído para os *clusters* gerados na primeira fase. Na terceira fase (otimização), um modelo de programação linear binário é otimamente resolvido para obter uma solução viável.

3. Metodologia

O problema de roteamento marítimo com estoques pode ser dividido em três subproblemas: roteamento, estadia (tempo de permanência no porto, seja operando ou esperando) e estoque. Na metodologia desenvolvida, os problemas de roteamento e estadia são resolvidos por uma metaheurística *Simulated Annealing* [Kirkpatrick et al., 1983], e, no que diz respeito à parte de estoque, optou-se por utilizar um modelo matemático de programação linear.

A cada avaliação de movimento efetuado pela metaheurística, a informação sobre em que momento cada navio está em cada porto é gerada e passada ao modelo de programação linear para o cálculo do custo de estoque associado. Assim, resumidamente, o método foi estruturado de maneira que, partindo de uma solução inicial, fossem selecionadas rotas aleatoriamente e realizadas alterações que buscassem diminuir os custos da solução final.

3.1. A Metaheurística

Uma solução na metaheurística guarda para cada navio, a ordem dos portos que este visita, junto com o tempo total de estadia em cada porto. Inicialmente, definiu-se um conjunto de movimentos que podem ser aleatoriamente selecionados, que alteram ou o posicionamento dos portos para cada navio, ou o tempo de estadia. O conjunto de movimentos possíveis é:

- `Swap`: troca da posição entre dois elementos;
- `Relocate`: exclusão de um elemento com reinserção em outra posição;
- `Insert`: inserção de um elemento;
- `Delete`: exclusão de um elemento.

Para o roteamento dos navios, i.e., a alteração na ordem dos portos, implementou-se os movimentos de `Swap`, `Relocate`, `Delete` e `Insert`. Os dois primeiros movimentos em suas versões intra-rota (em uma mesma rota) e inter-rotas (entre duas rotas distintas). Para movimentos de estadia, considerou-se somente variações dentro de uma mesma rota de `Swap` e outros dois movimentos que avaliam o incremento ou decremento de um dia na permanência de um navio em determinado porto, análogos aos movimentos de `Insert` e `Delete`.

Uma vez selecionado o movimento de forma aleatória, realiza-se a avaliação de custos proveniente deste movimento. Esta avaliação abrange os custos de roteamento, de estadia e de estoque. Os custos de roteamento e estadia são calculados pela própria vizinhança em tempo constante, enquanto que para o cálculo dos custos de estoque, deve-se executar o modelo de programação linear. Conforme dito anteriormente, é necessário que a metaheurística forneça a informação de qual navio atende qual porto em qual dia para que o modelo possa ser executado.

Caso a diferença de custos proveniente da avaliação do movimento seja negativa, ou seja, a execução do movimento melhore o custo total da solução, ou o fator de probabilidade do *Simulated*

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Annealing aceite uma solução de piora em determinado momento, o movimento é realizado gerando uma nova solução as alterações nas rotas ou estadias.

O custo total da solução atual é então comparado com o custo da melhor solução conhecida e, se for melhor, a melhor solução conhecida é atualizada. O procedimento completo é repetido até chegar ao limite do método do *Simulated Annealing*. Vale comentar que se, com os movimentos aleatórios realizados pela metaheurística, a rota exceder o horizonte de tempo, é realizado o descarte dos dias excedentes, considerando apenas o horizonte avaliado. Para um entendimento geral do caso a ser estudado, na Figura 1 encontra-se um simples diagrama da metodologia proposta para resolução do problema.

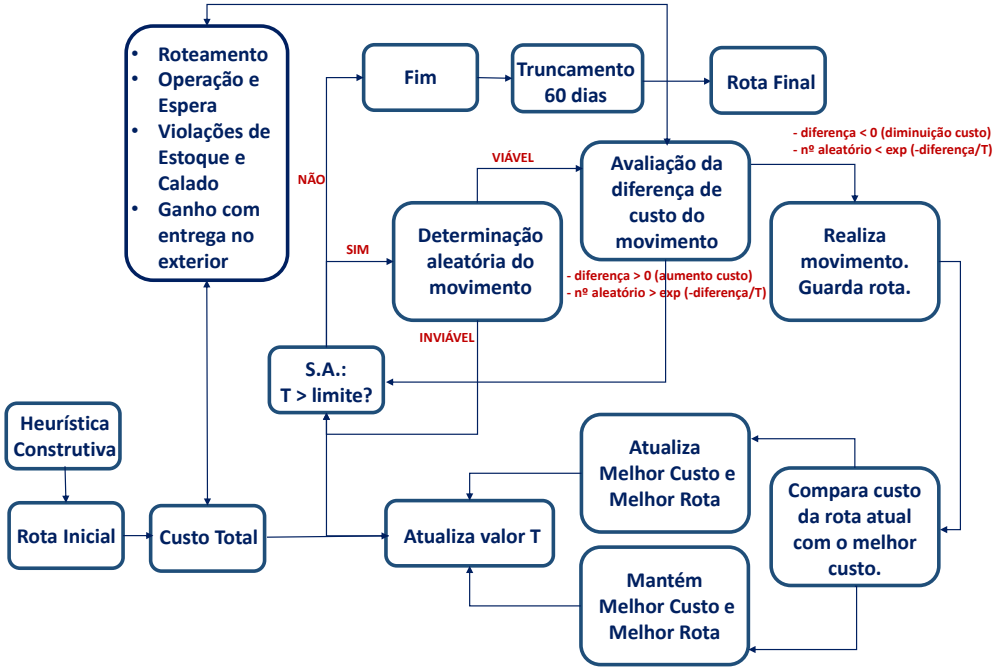


Figura 1: Estrutura do Método

3.2. O Modelo Matemático

Conforme descrito na seção anterior, a cada movimento da metaheurística, o modelo de programação linear é executado para a otimização dos custos referentes a estoque, respeitando as restrições estabelecidas pelo problema. São avaliadas as rotas de um conjunto V de navios, que podem visitar um conjunto N de portos, em um horizonte T de dias. São apresentadas, nas Tabelas 1 e 2, as variáveis e os parâmetros do modelo e, posteriormente, as equações do modelo.

A constante y_{vi}^{t} é a ligação do modelo com a metaheurística. A metaheurística calcula o custo de roteamento e avalia se um navio $v \in V$ estará em um determinado porto $i \in N$ em um determinado dia $t \in T$. Se afirmativo, o valor de y_{vi}^{t} é igual a 1, caso contrário igual a 0. Essa informação permite que o modelo saiba as rotas e estadias de cada navio para que possa ser construído e resolvido corretamente, fornecendo assim o valor referente ao custo de estoque à metaheurística para que ela possa decidir por melhores soluções. A cada iteração, os valores das constantes y_{vi}^{t} são atualizados. Para que o problema não resulte em respostas inviáveis (devido a horizonte de tempo ultrapassado, estoques não-satisfeitos, calados não-respeitados) relaxam-se as restrições e penaliza-se com multas aplicadas ao custo total da solução, de modo que o sistema opte por soluções menos custosas.

Nome	Descrição
q^L_{vit}	Quantidade carregada no navio v no porto i no dia t
q^U_{vit}	Quantidade descarregada do navio v no porto i no dia t
s^t_i	Estoque do porto i no dia $t \neq 1$
l^t_v	Carga do navio v no dia $t \neq 1$
s^{slack}_{it}	Quantidade que viola o limite de estoque no porto i no dia t
l^{slack}_{vit}	Quantidade que excede o calado mínimo no porto i no dia t pelo navio v

Tabela 1: Variáveis

Nome	Descrição
s^1_i	Estoque inicial do porto i
l^1_v	Carga inicial no navio v
PD^t_i	Produção/demanda no dia t do porto i
S^{MX}_{it}	Limite de estoque superior no dia t do porto i
S^{MN}_{it}	Limite de estoque inferior no dia t do porto i
y^t_{vi}	Recebe valor 1 se navio v está no porto i no dia t, 0 caso contrário
K_v	Capacidade do navio v
L^{MX}_{vi}	Calado máximo do navio v no porto i
L^{MN}_{vi}	Calado mínimo do navio v no porto i
R_i	Vazão do porto i
E^U_i	Receita por entregar no porto no exterior i
C^S_i	Custo de estoque no porto i
C^H_{vi}	Custo por unidade operada pelo navio v no porto i
C^W_v	Custo de espera do navio v
μ	Custo por unidade violada de estoque e calado

Tabela 2: Parâmetros

$$\begin{aligned}
\min & \sum_{t\in T}\sum_{i\in N} C^S_i s^t_i + && \text{(custos de estoque)} \\
& \sum_{t\in T}\sum_{i\in N}\sum_{v\in V} \left(C^W_v\, y^t_{vi} + C^H_{vi}(q^L_{vit} + q^U_{vit})\right) - && \text{(custos de espera e operação)} \\
& \sum_{t\in T}\sum_{i\in N}\sum_{v\in V} E^U_i\, q^U_{vit} + && \text{(ganhos de entrega)} \\
& \mu\left(\sum_{t\in T}\sum_{i\in N} s^{slack}_{it} + \sum_{t\in T}\sum_{i\in N}\sum_{v\in V} l^{slack}_{vit}\right) && \text{(custos violações)}
\end{aligned} \tag{1}$$

sujeito a

$$s^t_i = s^{t-1}_i + PD^t_i + \sum_{v\in V}\left(q^U_{vit} - q^L_{vit}\right) \qquad \forall i \in N, t \in T\backslash\{1\} \tag{2}$$

$$s^{t-1}_i + \sum_{v\in V} q^U_{vit} + PD^t_i \leq S^{MX}_{it} + s^{slack}_{it} + \sum_{v\in V} q^L_{vit} \qquad \forall i \in N, t \in T\backslash\{1\} \tag{3}$$

$$s^{t-1}_i + \sum_{v\in V} q^U_{vit} + PD^t_i \geq S^{MN}_{it} - s^{slack}_{it} + \sum_{v\in V} q^L_{vit} \qquad \forall i \in N, t \in T\backslash\{1\} \tag{4}$$

$$s^t_i \geq S^{MN}_{it} - s^{slack}_{it} \qquad \forall i \in N, t \in T \tag{5}$$

$$s^t_i \leq S^{MX}_{it} + s^{slack}_{it} \qquad \forall i \in N, t \in T \tag{6}$$

$$l_v^t - l_v^{t-1} = \sum_{i \in N} \left(q_{vit}^L - q_{vit}^U\right) y_{vi}^t \qquad \forall v \in V, t \in T \backslash \{1\} \qquad (7)$$

$$l_v^t \leq K_v \qquad \forall v \in V, t \in T \qquad (8)$$

$$l_v^t y_{vi}^t \leq L_{vi}^{MX} \qquad \forall i \in N, v \in V, t \in T \qquad (9)$$

$$l_v^t y_{vi}^t \leq L_{vi}^{MN} y_{vi}^t - l_{vit}^{slack} \qquad \forall i \in N, v \in V, t \in T \qquad (10)$$

$$q_{vit}^L \leq K_v y_{vi}^t \qquad \forall i \in N, v \in V, t \in T \qquad (11)$$

$$q_{vit}^U \leq K_v y_{vi}^t \qquad \forall i \in N, v \in V, t \in T \qquad (12)$$

$$q_{vit}^U + q_{vit}^L \leq R_i \qquad \forall i \in N, v \in V, t \in T \qquad (13)$$

$$q_{vit}^L, q_{vit}^U, l_{vit}^{slack} \geq 0 \qquad \forall i \in N, v \in V, t \in T \qquad (14)$$

$$s_{it}^{slack} \geq 0 \qquad \forall i \in N, t \in T \qquad (15)$$

$$l_v^t \geq 0 \qquad \forall v \in V, t \in T \qquad (16)$$

A função objetivo (1) reflete a minimização dos custos de estoques somados às penalidades de violação de estoques mínimo e máximo, bem como de calado mínimo, e, também, aos custos de operação e espera do navio, além de um possível ganho, caso haja entrega de produto em portos do exterior. A primeira restrição (2) é referente ao fluxo de estoque nos portos contemplando a produção / demanda assim como as cargas e descargas dos navios nos portos. As restrições (3) e (4) contemplam o balanço de massa no estoque, considerando os limites máximo e mínimo de estoques nos portos e, se for o caso, a quantidade excedida ou a insuficiência. As restrições (5) e (6) verificam a quantidade excedida ou a insuficiência de estoque nos portos. Essas quantidades excedidas ou insuficientes são penalizadas na função objetivo.

A restrição (7) diz respeito à variação da carga do navio devido às operações de carga e descarga por ele realizadas. A restrição (8) expressa que a capacidade do navio deve ser respeitada. As restrições (9) e (10) são referentes aos calados máximo e mínimo de cada porto, respectivamente. Para a restrição de calado mínimo, é realizado um relaxamento, permitindo uma penalidade caso o calado não seja respeitado. As restrições (11) e (12) indicam que as cargas e descargas que cada navio realiza em cada porto em um período devem ser menores que a capacidade de cada navio. A restrição (13) refere-se a vazão máxima diária média do porto, que as cargas e descargas dos navios devem respeitar. O conjunto de restrições (14), (15) e (16) referem-se ao domínio das variáveis do modelo. Além disso, as quantidades iniciais de estoque de cada porto (s_i^1) e as cargas iniciais de cada navio (l_v^1) são alimentadas ao modelo.

3.3. A Heurística Construtiva

Para construção de uma solução inicial foi elaborada uma heurística construtiva. Inicialmente é calculada para todos os portos a quantidade de dias para escoar toda demanda ou produção acumulada. Partindo da posição original de todos os navios, supondo todos parados, roda-se o modelo e obtém-se as violações de estoques totais ao longo dos 60 dias para todos os portos. Essas violações são ordenadas da maior para a menor e associadas aos portos e ao valor máximo de dias necessários para escoamento da demanda ou produção. A partir disto, são inseridos aleatoriamente os portos nas rotas, respeitando o horizonte de tempo e o modelo de estoque. Um porto só pode ser inserido uma única vez em cada rota, porém pode estar em diferentes rotas iniciais.

4. Aplicação da Metodologia

São avaliadas as operações de 12 a 16 navios em 18 portos (15 nacionais e 3 no exterior) em 10 diferentes meses, considerando um horizonte de aproximadamente 60 dias e um único produto. As produções e demandas não são necessariamente constantes, podendo variar ao longo do

horizonte. Os custos de operação e de espera dos navios nos portos são diferentes entre si e conhecidos. A frota de navios é heterogênea com restrições de calado mínimo e máximo, bem como de capacidade. Suas posições iniciais são conhecidas, podendo estar em mar ou em um porto. As cargas iniciais dos navios são conhecidas e cargas e descargas parciais são permitidas.

O tratamento dos portos nacionais e no exterior é diferenciado. Portos nacionais configuram como produtores ou consumidores, podendo assim os navios carregarem ou descarregarem nestes portos, atendendo as restrições de estoque mínimo e máximo e vazão dos mesmos. Os portos no exterior são somente consumidores, e, portanto, os navios podem somente descarregar neles, mediante um ganho. Estes portos não têm produção ou demanda e nem restrições de estoque. O ganho com a descarga é para permitir ao modelo a possibilidade de entrega nestes portos, uma vez que, por serem distantes e não terem demanda, caso não houvesse ganho, não seria possível contemplar as entregas no exterior, que existem na realidade.

Este variante é uma versão do problema estudado por Costa [2018]. As diferenças são: a consideração de um produto único, os navios poderem estar simultaneamente em um mesmo porto e a diferenciação de quando o navio opera e de quando o navio espera em um determinado porto é feita mediante a diferença de custos de operação e espera de cada navio. Por motivos de confidencialidade, os dados utilizados não podem ser publicados. Além disso, os resultados apresentados não representam o desempenho da empresa.

4.1. Resultados

A metaheurística foi desenvolvida em linguagem Julia 1.05. e os resultados analisados em Microsoft Excel. Utilizou-se um computador com processador Intel(R) Core(TM) i5-6300U com 8,00 GB de RAM. Os dados são os mesmos utilizados por Costa [2018] para a roteamento de derivados escuros.

Foram contemplados dados de 10 diferentes meses, de agosto a maio. Para cada mês, considerou-se um cenário de horizonte de aproximadamente 60 dias. O tempo computacional para cada rodada é de aproximadamente 40 minutos. A Figura 2 contempla os resultados de ocupação de estoque média, máxima e mínima dos portos para os 10 diferentes meses estudados. A linha superior é referente a ocupação máxima alcançada, a linha do meio corresponde à ocupação média e, por fim, a linha inferior à ocupação mínima de estoque.

No que diz respeito a violações de estoque, nota-se que, somente, para alguns casos, há ocupações mínimas abaixo de zero ou ocupações máximas excedendo os 100%. Na Tabela 3 encontram-se as violações de estoque totais no horizonte de 60 dias para os 10 diferentes cenários em todos os portos. São baixas e não-repetitivas entre os portos. Para maioria dos casos, a ocupação máxima fica em torno de 80% a 100%, a média na faixa de 40% a 60% e a mínima 0%, com exceções de alguns horizontes como Agosto/Setembro, Outubro/Novembro, Fevereiro/Março, que chegam a 20%. Assim, além de um bom tempo computacional, do ponto de vista de estoque, o resultado do modelo fornece valores satisfatórios.

Um ponto interessante a ser notado é a violação do período Novembro/Dezembro que ocorre logo no início do horizonte. Se retroceder um período (Outubro/Novembro), observa-se que esta violação não ocorre. Isso indica que com um bom planejamento, realizado antecipadamente, é possível reduzir as violações. Importante também ressaltar que, na prática, é altamente improvável realizar um planejamento que não viole estoque, levando as empresas a procurarem soluções caras para fazê-lo.

Um dos pontos observados foi o baixo atendimento a portos no exterior (somente uma pequena entrega em um porto, em uma única operação): o modelo opta por atendimento do estoque nacional a exportação, ainda que esta represente um ganho. Essa situação é mascarada pela condição

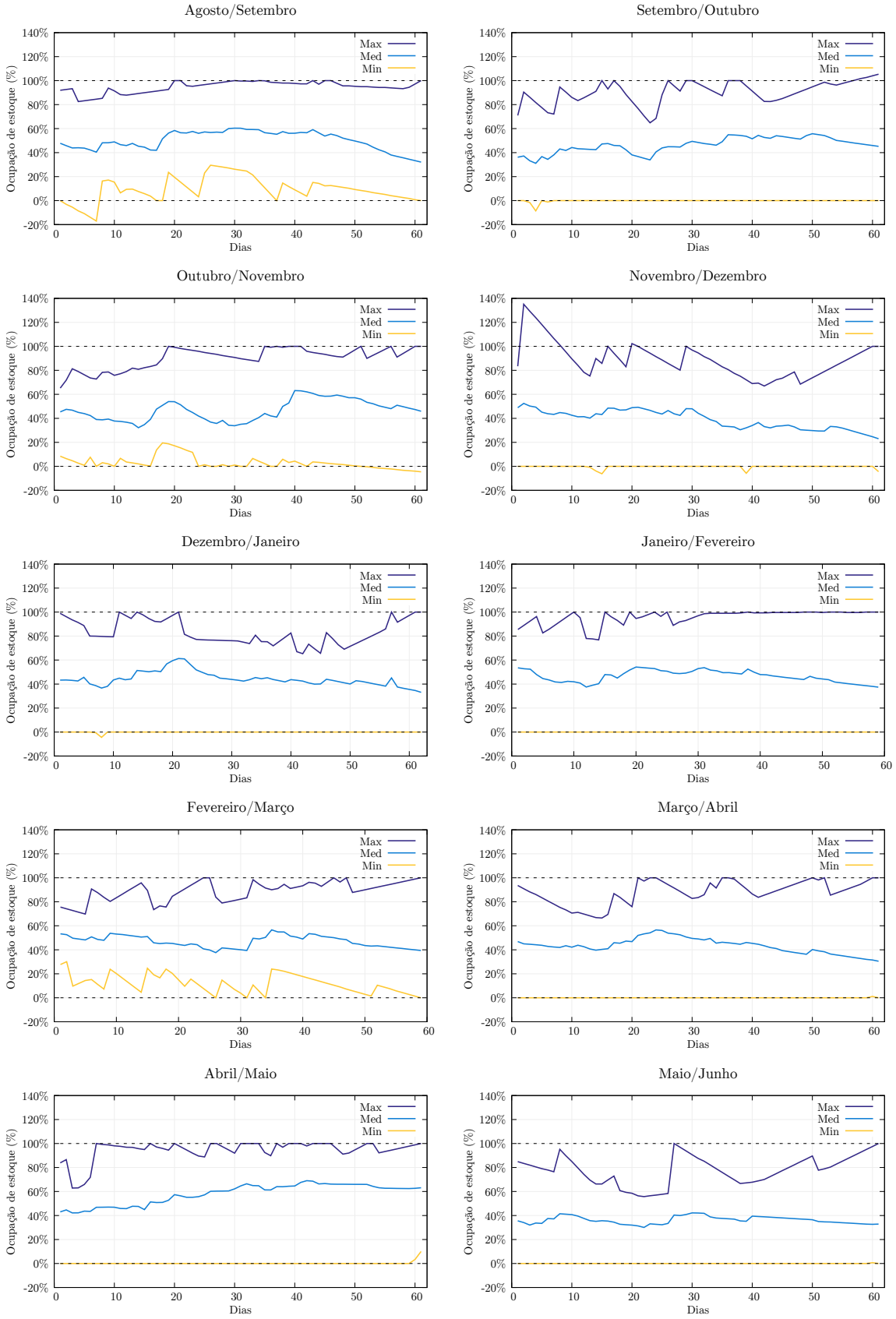


Figura 2: Ocupação de estoque ao longo do horizonte para os 10 diferentes meses

Mês	8	9	9	10	11	11	11	12
Porto	4	6	15	16	4	5	8	3
Violação	8	2	4	14	1	35	5	3

Tabela 3: Violações de Estoque

de haver um único produto. Na realidade, demanda e produção são de diferentes produtos e em diferentes quantidades e, muitas vezes, há excesso de um determinado produto e falta de outro. Estes excessos são exportados e não suprem a falta de outro. No cenário que todos os produtos são iguais, esta diferenciação é inexistente.

Em relação ao tempo de utilização do navio, isto é, o tempo total (tempo de navegação somado ao tempo de estadia) em relação ao horizonte de tempo de 60 dias, pode-se dizer que também foi satisfatório o resultado. Na Tabela 4 estão os resultados da utilização média de todos os navios de cada mês avaliado. Os navios, de maneira geral, não ficam ociosos, o que é favorável em termos de custo x benefício.

Mês	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
Utilização Média	80%	77%	84%	84%	78%	75%	79%	68%	75%	83%

Tabela 4: Utilização Média dos Navios

5. Considerações Finais

O problema de roteamento de navios com estoque é amplamente estudado por diversos autores considerando variadas extensões do caso básico [Christiansen e Fagerholt, 2009], assim como diferentes métodos de solução. Com o levantamento bibliográfico realizado percebeu-se que há oportunidades de melhoria nos métodos de solução para o problema de roteamento de navios com estoque.

Através de uma metaheurística combinada com um modelo matemático de programação linear foi possível a obtenção de resultados satisfatórios para o roteamento de navios contemplando o atendimento de estoque nos portos. O método foi estruturado de maneira que, aleatoriamente, partindo de uma solução inicial, fossem selecionadas rotas e realizadas alterações que buscassem diminuir os custos da solução final.

Como resultados positivos deste trabalho, destacam-se violações de estoque baixas, não-repetitivas entre os portos e com a tendência de acontecer no início do horizonte, indicando que, com um planejamento eficaz, é possível reduzir as violações. Os navios, de maneira geral, não ficam ociosos, o que é favorável em termos de custo x benefício. Além disso, o tempo computacional é satisfatório.

Ainda existem aspectos não contemplados neste trabalho, e podem ser objeto de estudo de trabalhos futuros, tais como a questão de multi-produto, melhor representação da situação de operação ou espera de um navio no porto, bem como a questão de berços, ou uma melhoria ainda mais significativa no tempo computacional.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos 425962/2016-4 e 313521/2017-4, e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

ANTAQ (2019). Agência Nacional de Transportes Aquaviários – Anuário Estatístico. http://portal.antaq.gov.br/wp-content/uploads/2020/02/Anu%C3%A1rio-2019-vFinal-revisado.pdf. Acessado em 12/06/2020.

Bertazzi, L., Coelho, L. C., De Maio, A., e Laganà, D. (2019). A matheuristic algorithm for the multi-depot inventory routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122:524–544.

Christiansen, M. e Fagerholt, K. (2009). Maritime inventory routing problems. *Encyclopedia of optimization*, 2:1947–1955.

Christiansen, M., Fagerholt, K., Flatberg, T., Haugen, Ø., Kloster, O., e Lund, E. H. (2011). Maritime inventory routing with multiple products: A case study from the cement industry. *European Journal of Operational Research*, 208(1):86–94.

Costa, L. G. V. d. (2018). Matheurísticas para a roteirização de navios com estoques e múltiplos produtos. Master's thesis, Departamento de Engenharia Industrial. PUC-Rio.

Dauzère-Pérès, S., Nordli, A., Olstad, A., Haugen, K., Koester, U., Per Olav, M., Teistklub, G., e Reistad, A. (2007). Omya hustadmarmor optimizes its supply chain for delivering calcium carbonate slurry to european paper manufacturers. *Interfaces*, 37(1):39–51.

Diz, G. (2017). *Maritime Inventory Routing: a practical assessment and a robust optimization approach*. PhD thesis, Departamento de Engenharia Industrial. PUC-Rio.

Hemmati, A., Hvattum, L. M., Christiansen, M., e Laporte, G. (2016). An iterative two-phase hybrid matheuristic for a multi-product short sea inventory-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 252(3):775–788.

Hemmati, A., Hvattum, L. M., Fagerholt, K., e Norstad, I. (2014). Benchmark suite for industrial and tramp ship routing and scheduling problems. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 52(1):28–38.

Homsi, G., Martinelli, R., Vidal, T., e Fagerholt, K. (2020). Industrial and tramp ship routing problems: Closing the gap for real-scale instances. *European Journal of Operational Research*, 283(3):972–990.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., e Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598):671–680.

Munguía, L.-M., Ahmed, S., Bader, D. A., Nemhauser, G. L., Shao, Y., e Papageorgiou, D. J. (2019). Tailoring parallel alternating criteria search for domain specific mips: Application to maritime inventory routing. *Computers & Operations Research*, 111:21–34.

Papageorgiou, D. J., Cheon, M.-S., Harwood, S., Trespalacios, F., e Nemhauser, G. L. (2018). Recent progress using matheuristics for strategic maritime inventory routing. In *Modeling, Computing and Data Handling Methodologies for Maritime Transportation*, p. 59–94. Springer.

Siswanto, N., Essam, D., e Sarker, R. (2011). Solving the ship inventory routing and scheduling problem with undedicated compartments. *Computers & Industrial Engineering*, 61(2):289–299.

Song, J.-H. e Furman, K. C. (2013). A maritime inventory routing problem: Practical approach. *Computers & Operations Research*, 40(3):657–665.

Uggen, K. T., Fodstad, M., e Nørstebø, V. S. (2013). Using and extending fix-and-relax to solve maritime inventory routing problems. *Top*, 21(2):355–377.

UNCTAD (2019). United Nations Conference on Trade and Development – Review of Maritime Transport. `https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2019_en.pdf`. Acessado em 12/06/2020.