



Luiz Gustavo Vieira da Costa

**Matheurísticas para a Roteirização de Navios com
Estoques e Múltiplos Produtos**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Rafael Martinelli Pinto

Rio de Janeiro
Setembro de 2018



Luiz Gustavo Vieira da Costa

**Matheurísticas para a Roteirização de Navios com
Estoques e Múltiplos Produtos.**

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

Prof. Rafael Martinelli

Presidente e Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Antônio Márcio Tavares Thomé

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Silvio Hamacher

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador (a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de setembro de 2018.

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

Luiz Gustavo Vieira da Costa

Graduou-se em Engenharia de produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2008. Iniciou suas atividades na Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) em outubro de 2008, na logística de derivados, onde continua até a presente data.

Ficha Catalográfica

Costa, Luiz Gustavo Vieira da

Matheurísticas para a roteirização de navios com estoques e múltiplos produtos / Luiz Gustavo Vieira da Costa; orientador: Rafael Martinelli Pinto. – 2018.

57 f.: il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Roteirização de navios com estoques. 3. Relax-and-fix. 4. Fix-and-optimize. 5. Programação inteira mista. I. Pinto, Rafael Martinelli. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Agradecimentos

À minha esposa Andreia, que sempre ajudou nos momentos difíceis e foi a principal responsável por eu ter chegado até aqui.

À minha família que sempre me apoiou e incentivou.

Ao gerente Campos, que me indicou para a turma de mestrado profissional.

Ao gerente Senne, que aprovou minha inscrição no curso.

À coordenadora Lilian, pela compreensão, apoio e motivação para que conseguisse atender os prazos.

Ao Gustavo Diz, que ajudou na escolha do tema e na implementação do modelo.

Ao Giuseppe e à Lúcia, por seu apoio na elaboração e formatação deste documento.

Aos demais amigos que me acompanharam nesta jornada.

A meu orientador Rafael Martinelli, sem o qual este trabalho não teria sido possível.

Aos professores da PUC-Rio.

A todos os demais que de alguma forma contribuíram e me incentivaram para a conclusão deste trabalho.

Resumo

Costa, Luiz Gustavo Vieira da; Pinto, Rafael Martinelli (Orientador). **Matheurísticas para a Roteirização de Navios com Estoques e Múltiplos Produtos**. Rio de Janeiro, 2018. 57p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo apresenta um modelo de programação inteira mista para a roteirização de navios com controle de estoque nos portos para a movimentação de múltiplos produtos com uma frota heterogênea. O modelo contempla a possibilidade de transformação de produtos dentro de navios, o que representa uma flexibilidade para o modelo optar por qual produto utilizar para atender um cliente com demanda com qualidade flexível. Esta habilidade não foi encontrada em nenhum outro estudo. Ele também combina o atendimento de demandas obrigatórias com opcionais. O modelo então é aplicado em um caso real de movimentação de derivados escuros de petróleo em uma empresa de petróleo brasileira, cujo modelo atual utilizado apresenta problemas que dificultam seu uso. Devido ao longo tempo que leva para obter a solução ótima para estes tipos de modelos, são utilizadas as matheurísticas de *relax-and-fix* e *fix-and-optimize* para obter soluções boas em um tempo reduzido. São apresentados experimentos computacionais em uma série de cenários para validar a qualidade das soluções encontradas pelos métodos propostos, testando diferentes configurações e discretizações de tempo. Os resultados apresentados comprovam a superioridade dos métodos em comparação com o modelo matemático puro. O modelo proposto apresentou grande potencial de substituir o modelo atual da empresa e para alcançar a melhoria pretendida na programação dos navios.

Palavras-chave

Roteirização de navios com estoques; *relax-and-fix*; *fix-and-optimize*; programação inteira mista.

Abstract

Costa, Luiz Gustavo Vieira da; Pinto, Rafael Martinelli (Advisor). **Matheuristic for a multi-product ship routing and scheduling with stock control**. Rio de Janeiro, 2018. 57p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation presents a mixed integer program model to solve a ship routing and scheduling with stock control in ports, also known as maritime inventory routing. This model considers a heterogeneous fleet, carrying multiples products. It also has the ability to transform one product into another inside ships. This aspect allows the model to choose which product it wishes to deliver to a client with a less restrict quality specification in his demand. No model presented in other studies has this capability. Another possibility covered by this model is to combine mandatory demands with optional ones. The model is applied to a real case of maritime transportation of dirty oil products in a Brazilian oil company, whose current model has a series of small problems that hinders its use. Due to the long time it takes to get the optimal solution, the relax-and-fix and fix-and-optimize heuristics are used to get good solutions in a reduced time. With the use of computational experiments in a series of scenarios, it has proved the quality of the solutions found by the proposed methods, testing different configurations and discretizations of time. The results presented prove the superiority of the methods in comparison to the pure mathematical model. The proposed model has shown great potential to replace the current one and to achieve the improvement for the ship routing intended by the company.

Keywords

Ship routing and scheduling; maritime inventory routing; relax-and-fix; fix-and-optimize; mix integer program.

Sumário

1 Introdução	10
1.1. Estrutura do trabalho	12
2 Referencial Teórico	14
2.1. Roteirização de navios	14
2.2. <i>Heurística relax-and-fix e fix-and-optimize</i>	17
3 Modelo Proposto	21
3.1. O modelo	23
3.2. Métodos de solução aplicados	29
4 Descrição do Caso	36
4.1. A movimentação de derivados	36
4.2. Os produtos escuros	37
4.3. Detalhamento da movimentação de escuros	38
4.4. O modelo atual	40
4.4.1. Primeira etapa	41
4.4.2. Segunda etapa	42
4.4.3. Avaliação do modelo	42
4.5. Utilização do modelo proposto	44
5 Resultados obtidos	47
5.1. Aplicação do modelo	47
6 Conclusão	53
6.1. Trabalhos futuros	54
7 Referências bibliográficas	56

Lista de figuras

Figura 1 – Primeira iteração do <i>relax-and-fix</i> .	18
Figura 2 – Segunda iteração do <i>relax-and-fix</i> .	18
Figura 3 – Etapas do <i>fix-and-optimize</i> .	19
Figura 4 – Exemplo da necessidade de uso de transformação de produto.	22
Figura 5 – Primeira etapa do <i>relax-and-fix</i> modificado. Utiliza blocos de 10 dias e um bloco fixo ao final.	30
Figura 6 – Segunda etapa do <i>relax-and-fix</i> modificado.	31
Figura 7 – Primeira etapa do <i>Fix-and-optimize</i> utilizando pares de navio.	32
Figura 8 – Segunda etapa do <i>Fix-and-optimize</i> utilizando pares de navio.	32
Figura 9 – Portos brasileiros com movimentação de derivados escuros.	38
Figura 10 – Entradas e saídas da primeira etapa do modelo.	41
Figura 11 – Entradas e saídas da segunda etapa do modelo.	42
Figura 12 – Exemplo da utilização de portos clone para avaliação da exportação.	46
Figura 13 – Resultados do modelo. Logaritmo dos <i>gaps</i> absolutos de cada cenário.	48
Figura 14 – Tempo de duração de cada método em minutos.	48

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação das dimensões dos problemas estudados.	17
Tabela 2 – Conjuntos.	23
Tabela 3 – Parâmetros.	24
Tabela 4 – Variáveis Contínuas.	25
Tabela 5 – Variáveis binárias.	25
Tabela 6 – Exemplo da conversão entre 1 e 2 dias por período no modelo.	33
Tabela 7 – Combinação de pares de navios para exemplo com 6 navios.	35
Tabela 8 – Resultados obtidos para cada cenário e tempo de execução.	47
Tabela 9 – Excesso de estoques na solução de um cenário.	49

Introdução

O transporte de mercadorias por navio é o principal modal do comércio internacional. Isso ocorre devido a sua grande eficiência para transportar grandes volumes a longas distâncias. Para que os produtos cheguem no prazo e com custos competitivos é necessário que o programador da frota marítima utilize os navios de forma cada vez mais eficiente. Buscando a melhoria do uso dos navios, a quantidade de publicações sobre roteirização de navios tem aumentado nas últimas décadas (Chistiansen et al., 2013; Agra et al., 2013). Estes estudos vão desde o dimensionamento da frota até a programação de curto prazo dos navios.

O problema de roteirização de navios consiste em definir por quais portos cada navio irá passar e em que sequência. O navio deve passar pelos portos de origem de uma carga e levá-la até seu destino. O problema é similar ao de roteirização de veículos. As principais diferenças são que os veículos normalmente iniciam e terminam seu roteiro no depósito e normalmente fazem seu trajeto em um único dia. Já os navios não têm um porto de origem obrigatório. Podem iniciar ou terminar seu percurso em qualquer lugar. Em relação ao tempo de cada viagem, pode levar de poucos dias até meses. Em ambos problemas a quantidade carregada em cada veículo, ou navio, deve respeitar a capacidade disponível, podendo inclusive haver veículos com capacidades diferentes.

Quando o operador dos navios também é o gestor dos estoques nos terminais temos um problema conhecido como *Maritime Inventory Routing* (MIR). Nesse problema, as rotas dos navios são definidas de forma a manter os estoques em cada porto dentro dos limites inferior e superior estabelecidos. Nesse caso as cargas não têm uma origem e destino definidos, mas devem ser movimentadas para manter os níveis de estoque adequados tanto nos portos produtores quanto nos consumidores. O MIR representa os problemas de muitas indústrias de produtos armazenados e transportados em graneis, como grãos, carvão, minérios e derivados de petróleo (Diz et al., 2017). Dentre essas empresas está a empresa brasileira de petróleo, que será estudada nessa dissertação.

A empresa produz e refina petróleo, sendo também responsável pelo transporte de óleo e derivados entre os elos da cadeia de suprimentos. Ela contrata os navios que fazem o transporte de seus produtos e define qual rota eles devem seguir, além de quais produtos eles devem carregar. Os navios transportam apenas produtos de propriedade da própria empresa. A programação precisa ser capaz de aliviar os pontos produtores de forma a não parar a produção por excesso de estoque e atender os pontos consumidores de forma que não falte produto.

A empresa transporta diversos grupos de produtos, como petróleo, GLP (gases como propano e butano), claros (nafta, gasolina, querosene e diesel) e escuros (óleos combustível). Esse trabalho irá se focar somente no estudo do último grupo, os derivados escuros. Cada grupo tem sua frota própria e características distintas. Os derivados escuros normalmente são resíduos do processo de refino. Por essa razão suas especificações não são muito restritas, como as dos demais derivados. Suas principais características avaliadas são a densidade, viscosidade, teor de metais e de enxofre. Mas, como essas restrições de qualidade têm faixa muito larga, alguns pontos produzem um produto que atende os requisitos de qualidade de produtos distintos, podendo atender a demanda de ambos. Dessa forma, além de definir o porto de destino desse produto, a programação deve definir em qual dos produtos ele deve ser transformado. A transformação não é física, somente lógica, e significa que o produto original está atendendo a demanda do produto final A ou do produto final B, os quais ele atende os requisitos. Além do atendimento do mercado nacional, parte da produção é exportada. Por isso, apesar do foco da programação ser nos próximos dias, é necessário avaliar um horizonte maior, de até 60 dias.

A programação das rotas desses navios é feita de forma empírica, baseado nos anos de experiência dos programadores. Buscando uma melhoria do processo de programação, a empresa está em fase de implantação de um sistema que indique a melhor rota para os navios de forma a atender as demandas de transporte ao menor custo. O sistema ainda não conseguiu ser utilizado de forma plena, pois algumas características do mesmo dificultam o seu uso e a qualidade de sua solução. Dentre os principais problemas identificados estão a separação do modelo de otimização em duas etapas e a ausência do estoque inicial a bordo dos navios. O primeiro faz com que a solução ótima da primeira etapa não considere algumas informações relevantes, só utilizadas na segunda etapa, gerando planos

inviáveis ou difíceis de pôr em prática. O segundo obriga o programador a fixar a rota dos navios até que esses fiquem vazios, deixando a cargo do usuário a definição dessa rota inicial.

Como solução para os problemas encontrados no sistema atual, este trabalho tem o objetivo principal de definir um modelo alternativo para resolver o problema da empresa. Esse modelo seria de uma única etapa, que considerasse todas as variáveis relevantes de uma vez, inclusive o estoque inicial em navios. Pelas características do problema e comparação com outros autores que resolveram problemas similares, optou-se pela utilização de um modelo MIR, com adaptações que, além de serem utilizadas pelo problema em questão, podem ser utilizadas para resolução de outros problemas reais.

Durante os testes do modelo com os dados reais, percebeu-se que o modelo era inviável de ser resolvido em um tempo hábil para utilização no dia a dia da empresa utilizando o método de otimização convencional. Por isso, foram utilizadas as matheurísticas *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*, de forma a obter soluções boas em um menor tempo. Matheurísticas são heurísticas que utilizam com base modelos matemáticos. A escolha por essas heurísticas foi devido a aplicações com bons resultados, inclusive em roteirização de navios, realizados por outros autores (Dillenberger et al., 1994; Gintnet el al., 2005; Diz el al., 2017).

Além do objetivo principal, esse trabalho tem duas contribuições: (1) propor um modelo que resolve um problema de MIR com uma frota heterogênea, movimentando múltiplos produtos que podem ou não serem transformados em outros; (2) mostrar abordagens de solução utilizando as matheurísticas que são capazes de resolver o problema real utilizando o modelo proposto em um tempo reduzido.

1.1

Estrutura do trabalho

O Capítulo 2 apresenta uma revisão de literatura sobre o tema de roteirização de navios com controle de estoques, além de apresentar as heurísticas *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*, que foram utilizadas para resolver o modelo. O Capítulo 3 apresenta o modelo proposto para a roteirização de navios com múltiplos produtos, além dos métodos de resolução utilizados. O Capítulo 4

detalha o caso real onde foi aplicado o modelo proposto. O Capítulo 5 apresenta a análise dos resultados da aplicação do modelo, comparando o método tradicional com as heurísticas propostas. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho.

2

Referencial Teórico

Neste capítulo será examinado o conteúdo publicado sobre problemas de roteirização de navios similares ao estudado e sobre as heurísticas *relax-and-fix* e *fix-and-optimize* utilizadas em sua resolução.

2.1

Roteirização de navios

Problemas de roteirização de navios consistem em definir a programação a ser seguida por cada navio, incluindo os portos que ele deve passar e os produtos que deve carregar e descarregar em cada um deles. As cargas e descargas normalmente têm uma janela de tempo em que podem acontecer, como a disponibilidade do produto ou o prazo de entrega. Cada carga a ser transportada tem sua origem e destino definidos, cabendo ao modelo decidir qual navio deve carregá-la de forma a atender as datas definidas. O importante é utilizar os navios de forma eficiente, atendendo a necessidade de transporte com baixo custo. Dentre os problemas de roteirização de navios foi utilizado um conhecido como MIR. Segundo Chistiansen et al. (2013), MIR é um problema de planejamento onde se tem a responsabilidade de gerenciamento de estoque nos terminais de origem e destino, assim como pelo roteiro e programação dos navios. Neste tipo de problema não há uma quantidade predefinida de quantas vezes um navio deve ir a cada terminal e nem um destino pré-estabelecido para cada carga realizada. A frota de navios deve transportar os produtos de forma a deixar os estoques nos portos de origem e destino entre os limites inferior e superior. O objetivo é minimizar o custo de transporte sem deixar os estoques violarem os limites.

Diversos autores focaram em estudos com apenas um produto. Gronhaug et al. (2010) propuseram um modelo para movimentação de navios entre um terminal de liquefação de gás natural e os terminais de regaseificação. Os navios só carregam quando estão vazios e sempre carregam o volume completo. O modelo controla a quantidade a ser produzida e vendida além dos estoques nos

portos. Furman et al. (2011) apresentam um trabalho realizado na ExxonMobil sobre transporte de gásóleo de vácuo (VGO) através de um modelo de programação inteira mista que minimiza os custos de transporte. Os navios possuem capacidades variadas e podem ter restrições para operar em determinados portos. O modelo considera que cada porto só pode ser visitado uma única vez. Para contornar este problema são criados portos clones, que representam uma nova possibilidade de ter um navio parando no porto. Agra et al. (2013) apresentam uma modelagem utilizando a literatura já estabelecida de desigualdades válidas, comparando à modelagem tradicional e mostrando os ganhos que se tem utilizando este novo formato de modelo. Chistiansen et al. (2013) fazem uma outra revisão da literatura atualizando o trabalho previamente feito por Chistiansen et al. (2004). Além de apresentar os principais trabalhos na área, os autores apresentam contribuições próprias, como um modelo de MIR para um único produto com tempo discreto. Modelos discretos são aqueles que o tempo é dividido em parcelas definidas, ao contrário do contínuo onde pode assumir qualquer valor. Song e Furman (2013) apresentam um modelo de otimização com algumas heurísticas utilizadas para resolver subproblemas menores de forma a obter soluções superiores para o problema MIR original. Diz et al. (2017) realizaram comparações entre a utilização de modelos contínuos e discretos de tempo para o tempo de resolução da movimentação marítima de petróleo. Eles também apresentaram os ganhos em tempos de execução com a utilização de heurísticas e um estudo sobre incertezas utilizando otimização robusta.

Outros estudos envolvem modelos com múltiplos produtos. Nestes casos existe a necessidade de segregar os produtos transportados em segregações distintas nos navios, de forma a não misturar um produto com outro. Para armazenar outro produto em uma segregação é necessário esvaziá-la e condicioná-la para o recebimento do produto seguinte. Chistiansen et al. (2011) propuseram uma heurística para gerar a roteirização de navios em um caso real com múltiplos tipos de cimento. Falhas no atendimento à demanda de algum cliente poderiam ser resolvidas com movimentações rodoviárias a partir de um ponto de produção. Dessa forma foi definida uma priorização entre clientes de forma a garantir com maior nível de serviço a portos estratégicos. Outro estudo onde foram consideradas as movimentações de múltiplos produtos foi apresentado por Agra et

al. (2013b), onde foi estudado o atendimento à demanda de 4 tipos de óleos combustíveis. Siswanto et al. (2011) propuseram um modelo multiproduto que detalha o uso dos tanques dos navios para cada produto, sem a necessidade de predeterminar um produto dedicado. O modelo pode decidir alterar o produto de cada tanque desde que este se encontre vazio. Persson e Göthe-Lundgren (2005) propuseram um modelo de roteirização que podia criar ou destruir produto, representando a violação de estoques como um custo de penalização. Em nenhum trabalho de roteirização de navios com controle de estoque com múltiplos produtos estudado foi encontrado a transformação no navio de um produto em outro pelo modelo. Essa possibilidade é fundamental para o problema tratado neste trabalho e será mais detalhado no próximo capítulo.

Modelos de MIR com tempo contínuo têm dificuldades de representar taxas de produção e consumo variáveis ao longo do horizonte (Agra et al., 2013). Modelos de tempo discreto tratam essa questão de forma mais simples. Diz et al. (2017) mostraram em uma comparação usando os mesmos cenários que o modelo discreto tem tempo de solução pior que o contínuo. Ele complementa, mostrando que o modelo *Fixed Charge Network Flow* (FCNF) com desigualdades válidas, apresentado por Agra et al. (2013) tem um tempo de resolução menor que ambos, por ter limites de relaxação linear mais apertados. Ainda assim, modelos de roteirização de navios permanecem de solução complexa e demorada utilizando métodos de solução de MIP tradicionais. Muitos modelos só conseguem obter ou provar que obtiveram a solução ótima para casos simples. A Tabela 1 compara as dimensões dos estudos apresentados por diversos autores.

Tabela 1 – Comparação das dimensões dos problemas estudados.

Autor	Horizonte	# navios	# portos	# produtos
Grønhaug et al. (2010)	30 a 75 dias	2 a 5	4 a 6	1
Agra et al. (2013)	30 a 60 períodos	2 a 5	3 a 6	1
Agra et al. (2013b)	10 a 15 dias	2 a 4	7	4
Persson e Göthe-Lundgren (2005)	30 dias	2 a 3	7 a 18	4
Al-Khayyal e Hwang (2007)	10 dias	2	3	2
Christiansen et al. (2011)	14 dias	5	33	11
Siswanto et al. (2011)	15 dias	2	3	2
Agra et al. (2015)	15 dias	2 a 4	7 a 9	4
Furman et al. (2011)	30 a 60 dias	5 a 10	-	1
Song e Furman (2013)	60 dias	5 a 6	6 a 8	1
Diz et al. (2017)	15 a 30 dias	3 a 7	5 a 15	1
Esse trabalho	60 dias	14 a 16	19	8

Fonte: O autor.

Conforme é possível observar a grande maioria dos modelos foi testada com dados com dimensões menores que este estudo, com horizonte de até um mês, menos de 10 navios e menos de 10 portos. Os autores pesquisados que analisaram casos reais utilizaram heurísticas ou dividiram o modelo em subproblemas de forma a chegar a uma solução em tempo adequado. Apesar de não garantirem o resultado ótimo, essas soluções permitem resolver problemas grandes até resultados muito próximos do ótimo global. Duas dessas heurísticas serão apresentadas a seguir.

2.2

Heurística relax-and-fix e fix-and-optimize

A solução de problemas inteiros mistos até a solução ótima vai se tornando mais difícil conforme o tamanho do problema vai aumentando. O método tradicional de resolução tem um desempenho muito ruim para casos grandes. Para casos reais, onde existem problemas de grandes dimensões, é complicado obter a solução ótima e, às vezes, inclusive uma solução inteira boa. Como alternativa para melhorar o desempenho, Dillenberger et al. (1994) sugerem o uso de uma heurística que resolve um problema de programação inteira mista por partes. Ele estuda um problema de produção de peças ao longo dos dias, onde deve-se decidir quais itens serão feitos pelas máquinas e em qual ordem. A heurística que ele

utiliza para resolução do problema é conhecida como *relax-and-fix*. Para resolver o problema original, no lugar de considerar todas as variáveis como inteiras de uma vez, é utilizado um processo iterativo, onde as variáveis têm a restrição de serem inteiras devolvidas sucessivamente.

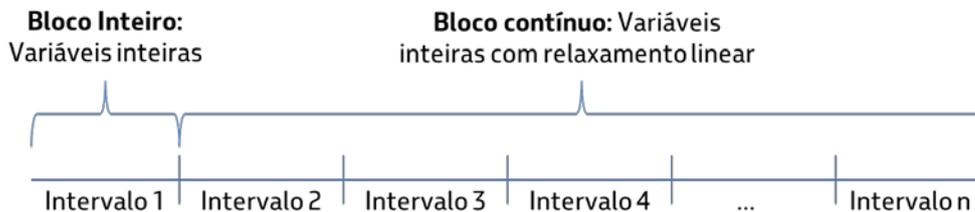


Figura 1 – Primeira iteração do *relax-and-fix*.

Fonte: Adaptado de Diz et al. (2017).

Na primeira iteração, como mostrado na Figura 1, apenas as variáveis do primeiro período são restritas a serem inteiras, com as demais livres para assumir qualquer valor contínuo. O problema é então resolvido com essa premissa. O resultado inteiro do primeiro período é então fixado com os valores obtidos.

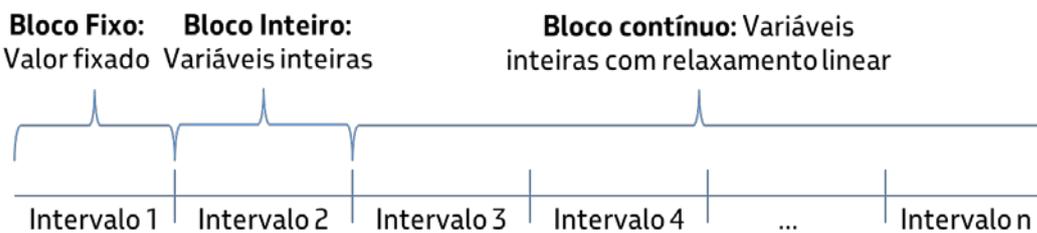


Figura 2 – Segunda iteração do *relax-and-fix*.

Fonte: Adaptado de Diz et al. (2017).

Na iteração seguinte, mostrada na Figura 2, o segundo período tem suas variáveis com restrição de serem inteiras, enquanto o primeiro período mantém o valor fixo obtido anteriormente e os períodos posteriores continuam com as variáveis relaxadas como contínuas. As iterações vão percorrendo os períodos sempre deixando um período como inteiro, todos os períodos anteriores como fixos e os posteriores assumindo qualquer valor contínuo. Ao completar a iteração do último período tem-se uma solução para o problema. Em alguns casos, ao se fixar os resultados dos períodos passados, pode-se criar um subproblema sem solução viável. O problema como um todo pode apresentar uma solução inteira, mas as decisões anteriores do modelo acabam levando a um cenário sem solução. Neste caso, a heurística para de seguir para frente e retorna ao estágio anterior. No

lugar de pegar a melhor solução inteira encontrada, deve-se usar a segunda melhor solução, ou seja, a melhor solução pior que a anterior. Mantendo-se a inviabilidade passa-se para a terceira melhor e assim sucessivamente. Ao final, obtém-se uma solução viável para o problema em um tempo reduzido. O objetivo da heurística é que a solução encontrada tenha um resultado próximo ao ótimo. Nos casos estudados pelos autores esse objetivo foi atendido.

Uma outra alternativa é apresentada por Gintner et al. (2005), que propõem uma heurística chamada *fix-and-optimize*. Os autores estudam o problema de roteirização de veículos, alocando ônibus, que partem de depósitos, para atender uma determinada demanda programada de viagens. Terminada cada viagem, o ônibus fica disponível para ser alocado em uma viagem que comece depois e haja tempo para ele chegar ao seu ponto de partida. Devido à complexidade combinatória do problema, onde se avaliam os vários arcos de rota possíveis de serem percorridos, o problema muitas vezes não pode ser resolvido por *solvers* tradicionais. Dessa forma, os autores propõem essa heurística como alternativa para chegar a uma solução boa. Ela se baseia em não tentar resolver o problema inteiro de uma vez, buscando simultaneamente o melhor resultado para todas as variáveis inteiras. Ao invés disso, usa problemas simplificados para obter o resultado de algumas das variáveis inteiras apenas. Depois, os resultados destas variáveis são fixados no modelo e resolve-se o problema completo para obter o valor das demais variáveis, como mostrado na Figura 3.

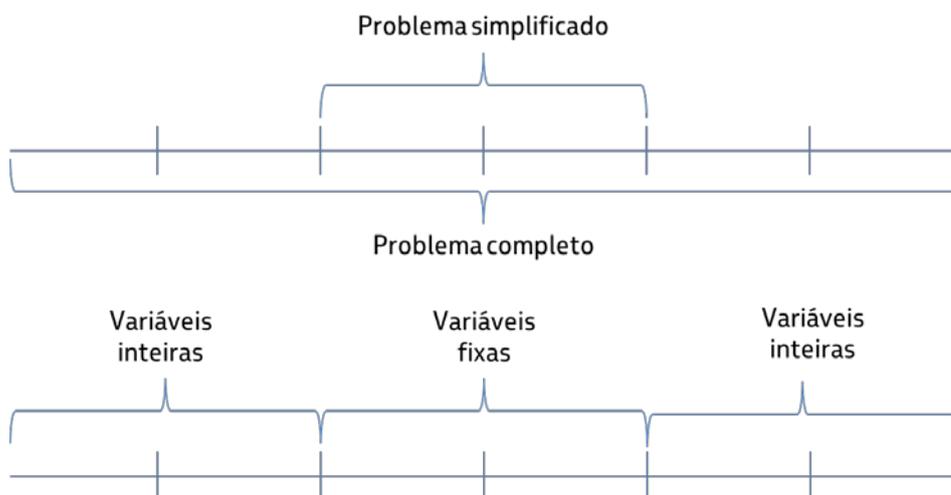


Figura 3 – Etapas do *fix-and-optimize*.

Fonte: O autor.

No caso estudado pelos autores, o problema é resolvido considerando apenas um depósito de ônibus por vez. As sequências de viagens que se repetem para vários depósitos são consideradas estáveis e fixadas no modelo original. Dessa forma a complexidade do problema original é reduzida. Devido a essa redução, é possível obter uma solução para ele em um tempo reduzido. A heurística também não garante o resultado ótimo, mas os resultados obtidos se aproximaram muito desse, com gaps pequenos.

Diz et al. (2017) utilizam as heurísticas *relax-and-fix* e *fix-and-optimize* para resolver um problema de MIR para transporte de petróleo entre os portos produtores e os consumidores. São mostrados algoritmos para a aplicação das heurísticas e como elas encaixam entre si. Primeiro, a heurística *relax-and-fix* é utilizada para obter uma solução viável para o problema. Em seguida é aplicada a *fix-and-optimize* para buscar uma melhoria no resultado da heurística anterior. Os autores mostram que apesar das heurísticas não garantirem a solução ótima para o problema, elas conseguiram obter resultados muito próximos a ele para esse tipo de problema. A principal vantagem é que utilizaram 24% menos tempo computacional. Os autores finalizam afirmando que essas heurísticas se mostraram bem eficazes para resolver problemas deste tipo, inclusive para dimensões grandes.

3

Modelo Proposto

O modelo utilizado foi adaptado da formulação de fluxo com tempo discreto de Chistiansen et al. (2013). Ele considera uma frota heterogênea, controlando os estoques de um único produto nos portos e navios. As adaptações realizadas foram:

(1) a inclusão de múltiplos produtos no modelo. Foram incluídas capacidades de armazenamento para cada um dos produtos em cada terminal, podendo ser zero, caso o terminal não opere com o produto. O modelo não tem a liberdade de converter um tanque de terra para operar com outro produto. As capacidades de armazenagem só podem ser alteradas pelos parâmetros pré-definidos no modelo. Em relação aos navios, apesar de fisicamente os produtos distintos terem que permanecer em tanques separados, essa restrição foi relaxada devido à complexidade de permitir o modelo controlar dinamicamente os produtos de cada segregação e à limitação de restringir uma quantidade pré-definida de cada produto no navio. Assim, optou-se por considerar que qualquer combinação de quantidades poderá ser carregada no navio;

(2) a inclusão da possibilidade de transformação entre produtos. Essa alteração se faz necessária para dar ao modelo a possibilidade de escolher qual produto utilizar para atender uma demanda com qualidade flexível. Ou então para definir qual o destino de um produto com possibilidade de atender demandas de produtos distintos. A Figura 4 mostra um exemplo fictício de caso onde se faz necessário o uso dessa modelagem. Nela, existem dois produtos que são produzidos, embalagens de plástico e embalagens de metal. Porém, um dos portos consumidores aceita qualquer um dos dois produtos para seu processo. Neste caso pode-se optar por pré-estabelecer quanto de cada um será entregue para este consumidor ou deixar que o modelo escolha, inclusive podendo ter receitas distintas. Para dar essa flexibilidade do modelo determinar quanto de cada produto vai suprir a demanda deste consumidor especial, considera-se essa demanda como um terceiro produto. Tanto a embalagem de plástico quanto a de metal podem ser transformadas neste terceiro produto. Um exemplo real ocorre com os derivados

de petróleo, cuja especificação não é um valor fixo, mas uma faixa de valores, e possuem preços diferentes dependendo da qualidade;

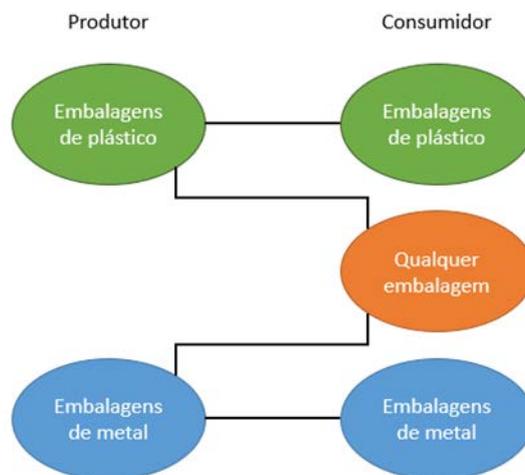


Figura 4 – Exemplo da necessidade de uso de transformação de produto.

Fonte: O autor.

(3) os ganhos com receita sobre demandas opcionais. O modelo considera demandas obrigatórias, e outras opcionais. As demandas opcionais existem apenas em portos onde não existem demandas obrigatórias para o produto em questão. Ela não é representada por uma redução do estoque no porto de destino. Ela pode ser atendida a qualquer momento, sem restrição. A quantidade máxima a ser entregue é representada pela capacidade do produto no porto de destino e atendê-la gera uma receita (ou redução do custo) na função objetivo. As demandas opcionais só serão atendidas quando a receita delas cobrir o custo da movimentação ou quando não houver destino obrigatório para o produto produzido e o navio precisar ser descarregado para liberar espaço para movimentar outro produto;

(4) o atendimento dos estoques nos portos. Originalmente o modelo tratava os estoques com uma restrição obrigatória. Optou-se por permitir a violação de estoques, penalizando-a na função objetivo. A penalização precisa ser grande o suficiente para compensar os demais custos, caso contrário o modelo opta por deixar os estoques violarem os limites e não movimentar os navios. Essa alteração é interessante, pois permite a análise detalhada de cenários com falhas de estoque. Estudando o resultado do modelo, é possível identificar se a falha é pontual, se o volume não entregue é grande e se perdura por muitos dias. Com base nessa análise pode-se tomar ações mitigadoras na utilização real do resultado como, por

exemplo, enviar o navio em velocidade máxima para que ele chegue a tempo de atender um cliente ou solicitar uma antecipação ou postergação da produção. Essa alteração permite também que se trabalhe com uma faixa de estoques desejados, como um estoque de segurança, por exemplo. A violação dessa faixa não significa a falta de produto necessariamente. É possível também trabalhar com custos distintos para a violação de cada produto em cada porto. Dessa forma pode-se estabelecer prioridades entre atendimentos de determinados portos ou produtos;

(5) a inclusão do tratamento de quantidade máxima e mínima a bordo dos navios para respeitar as restrições de calado. O calado é a distância entre o fundo do casco até a superfície da água. Quanto mais quantidade de produto a bordo do navio, maior o seu calado. Os portos muitas vezes apresentam restrições de profundidade, que fazem com que o navio não consiga operar com carga completa. Por outro lado, o calado aéreo é a distância entre a superfície da água e o ponto mais alto do navio. Alguns portos têm pontes que limitam o calado aéreo do navio que entra ou sai. Dessa forma é necessário que ele tenha uma quantidade mínima de produto a bordo para conseguir passar por baixo;

(6) inclusão de vazão de operação no porto. Os portos podem ter limitação para enviar ou receber produto, de forma que não é possível realizar a carga completa em um único período. Assim, foi incluído um valor que limita a quantidade que o navio pode carregar ou descarregar por período.

3.1

O modelo

A seguir estão detalhados os conjuntos, parâmetros, variáveis que compõe o modelo, nas Tabelas 2, 3, 4 e 5. Em seguidas estão apresentadas as equações do modelo.

Tabela 2 – Conjuntos.

Nome	Descrição
N	Portos, com os índices i e j
V	Navios, com o índice v
P	Produtos, com os índices p e p_d
T	Dias, com o índice t
A	Arcos. Contém os pares (i,j) entre os quais um navio pode navegar

Fonte: O autor.

Tabela 3 – Parâmetros.

Nome	Descrição
C_{ijv}	Custo de viagem do porto i ao porto j no navio v
C_v^W	Custo de espera em porto do navio v
C_{ip}^S	Custo unitário de estar com o estoque do produto p no porto i acima do máximo ou abaixo do mínimo. Valor fictício que deve ser alto o suficiente para forçar o modelo a respeitar os limites de estoque
T_{ij}	Tempo de navegação em dias inteiros entre o porto i e o porto j
B_{it}	Quantidade de berços disponíveis para atracação no porto i no dia t
K_v	Capacidade útil do navio v
L_{vp}^0	Estoque inicial do produto p a bordo do navio v
S_{ip}^0	Estoque inicial do produto p no porto i
PD_{ipt}	Produção ou demanda do produto p no porto i no dia t. A produção é representada por um valor positivo e demanda por um valor negativo
$Ssup_{ipt}$	Capacidade de armazenamento do produto p no porto i no dia t. Pode ser o valor real ou o valor máximo desejado
$Sinf_{ipt}$	Valor mínimo para o estoque do produto p no porto i no dia t. Pode ser zero ou ser um estoque mínimo desejado
F_{ppd}	Recebe valor 1 caso seja possível transformar o produto p em p _d . Recebe valor 0 caso contrário. A transformação é um artifício para atender a demanda de p _d com produto p
$Dmax_{iv}$	Representa a quantidade máxima de produto a bordo do navio v para que ele possa entrar ou sair no porto i. Está associado com a limitação de calado
$Dmin_{iv}$	Representa a quantidade mínima de produto a bordo do navio v para que ele possa entrar ou sair no porto i. Está associado com a limitação de calado aéreo
$O_{(v)}$	Origem artificial do navio v. O modelo necessita que o navio inicie em um porto. Como na prática o navio pode estar navegando no início do horizonte é criado este artifício. Este porto é tratado como outro qualquer pelo modelo, mas sua informação mais importante é a distância para os demais portos, visto que não há nada a se fazer nele
$D_{(v)}$	Destino artificial do navio v. O modelo requer que todo navio termine em um porto predefinido. Dessa forma cria-se um destino artificial onde o navio encerra sua programação
R_i	Representa a vazão média diária de carga e descarga do porto i. Caso o navio carregue e descarregue é considerada a soma da quantidade movimentada como limite
E_{ip}	Representa a receita (ganho) por descarregar o produto p no porto i

Fonte: O autor.

Tabela 4 – Variáveis Contínuas.

Nome	Descrição
L_{vpt}	Estoque do produto p a bordo do navio v ao final do dia t
Ql_{ipvt}	Quantidade carregada do produto p no navio v durante operação no porto i no dia t
Qu_{ipvt}	Quantidade descarregada do produto p no navio v durante operação no porto i no dia t
S_{ipt}	Estoque do produto p no porto i ao final do dia t
Q_{ipt}^{Sinf}	Representa a quantidade abaixo do limite inferior de estoque do produto p no porto i ao final do dia t
Q_{ipt}^{Sup}	Representa a quantidade acima do limite superior de estoque do produto p no porto i ao final do dia t
Qf_{pp_dvt}	Quantidade do produto p transformada em produto p _d no navio v durante o dia t

Fonte: O autor.

Tabela 5 – Variáveis binárias.

Nome	Descrição
X_{ijvt}	Recebe valor 1 caso o navio v opere no porto i no dia t seguindo imediatamente para o porto j. Caso contrário recebe valor 0
W_{ivt}	Recebe valor 1 caso o navio v espere no porto i no dia t. Recebe 0 caso contrário

Fonte: O autor.

Min

$$\begin{aligned}
& \sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in A} \sum_{t \in T} C_{ijv} X_{ijvt} + \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} C_v^W W_{ivt} \\
& + \sum_{i \in N} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} C_{ip}^S (Q_{ipt}^{Sinf} + Q_{ipt}^{Sup}) - \sum_{i \in N} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} E_{ip} (Qu_{ipvt} - Ql_{ipvt})
\end{aligned} \tag{1}$$

s.a.

$$\sum_{j \in N} \sum_{t \in T} X_{o(v)jvt} = 1, \quad v \in V, \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{j \in N} X_{jiv,t-T_{ji}-1} + W_{iv,t-1} - \sum_{j \in N} X_{ijvt} - W_{ivt} = 0, v \in V, \\
& i \in N \setminus \{o(v), d(v)\}, t \in T,
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{t \in T} X_{id(v)vt} = 1, \quad v \in V, \quad (4)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in N} X_{ijvt} \leq B_{it}, \quad i \in N, t \in T, \quad (5)$$

A Função Objetivo (1) minimiza os custos de navegação, portuários, de espera e de violar os limites mínimos e máximos de estoque reduzindo deles a receita com o atendimento de demandas opcionais. Em relação ao modelo original, foram acrescentadas a penalização por violar estoques e os ganhos com as demandas opcionais. As Restrições (2)-(4) representam a conservação do fluxo. Todos os navios saem de sua origem artificial e devem terminar em seu destino artificial. Quando está no porto o navio pode operar e ir para outro porto ou permanecer aguardando. As Restrições (5) indicam a disponibilidade de berços de cada porto. As Restrições (2)-(5) permanecem idênticas ao modelo original.

$$\sum_{p \in P} Ql_{ipvt} \leq K_v \sum_{j \in N} X_{ijvt}, \quad v \in V, i \in N \setminus \{o(v), d(v)\}, t \in T, \quad (6)$$

$$\sum_{p \in P} Qu_{ipvt} \leq K_v \sum_{j \in N} X_{ijvt}, \quad v \in V, i \in N \setminus \{o(v), d(v)\}, t \in T, \quad (7)$$

$$0 \leq Ql_{ipvt} \leq Ssup_{ipt} \sum_{j \in N} X_{ijvt}, \quad i \in N, p \in P, v \in V, t \in T, \quad (8)$$

$$0 \leq Qu_{ipvt} \leq Ssup_{ipt} \sum_{j \in N} X_{ijvt}, \quad i \in N, p \in P, v \in V, t \in T, \quad (9)$$

As Restrições (6) e (7) indicam que um navio só pode carregar ou descarregar produtos até o máximo da capacidade do navio. A variável que representa a quantidade foi dividida em duas, uma representando a carga e a outra a descarga. Além disto recebeu um novo índice que representa o produto operado.

As Restrições (8) e (9) indicam que o navio só pode carregar ou descarregar volume inferior a tancagem em terra. Elas também garantem que o navio só carrega ou descarrega quando está operando em algum porto. Essas restrições foram separadas das anteriores pela necessidade de associar cada variável de quantidade ao estoque do produto correspondente em terra.

$$L_{vp0} = L_{vp}^0, \quad v \in V, p \in P, t \in T, \quad (10)$$

$$\sum_{p \in P} L_{vpt} \leq K_v, \quad v \in V, t \in T, \quad (11)$$

$$L_{vp,t-1} + \sum_{i \in N} (Ql_{ipvt} - Qu_{ipvt}) + \sum_{p_d \in P} (Qf_{p_dvvt} - Qf_{pp_dvt}) - L_{vpt} = 0, v \in V, \\ p \in P, t \in T, \quad (12)$$

As Restrições (10) informam o estoque inicial de cada produto no navio. A única alteração foi a inclusão do índice de produtos. As Restrições (11) restringem que a cada momento a capacidade do navio deve ser respeitada. Novamente, apenas foi incluído o índice de produto. As Restrições (12) representam a conservação do fluxo de produtos em cada navio. O estoque será a quantidade no período anterior acrescida da carga, reduzida pela descarga e somada ao saldo de transformação entre produtos. A principal diferença destas restrições foi a inclusão da quantidade de produto transformada, mas a quantidade de carga também foi separada da descarga.

$$S_{ipt} - Sinf_{ipt} + Q_{ipt}^{Sinf} \geq 0, \quad i \in N, p \in P, t \in T, \quad (13)$$

$$S_{ipt} - Ssup_{ipt} + Q_{ipt}^{Ssup} \leq 0, \quad i \in N, p \in P, t \in T, \quad (14)$$

$$S_{ip0} = S_{ip}^0, \quad i \in N, p \in P, \quad (15)$$

$$S_{ip,t-1} + \sum_{v \in V} (Qu_{ipvt} - Ql_{ipvt}) - S_{ipt} + PD_{ipt} = 0, \quad i \in N, p \in P, t \in T, \quad (16)$$

As Restrições (13) e (14) indicam que, quando o estoque estiver fora de seus limites inferior e superior, as variáveis de penalização devem representar o volume violado. Estas restrições foram alteradas para retirar a restrição forte de atendimento ao estoque e incluir a penalização. As Restrições (15) indicam os estoques iniciais de cada produto em terra. Estas restrições também só foram alteradas pela inclusão do índice de produto. As Restrições (16) representam a conservação do fluxo de produtos em terra. Além da inclusão dos índices de produto, foram separadas as variáveis de carga e descarga.

$$Qf_{pp_dvt} \leq K_v F_{pp_d}, p \in P, p_d \in P, v \in V, t \in T, p \neq p_d, \quad (17)$$

$$Qf_{pp_dvt} \leq K_v \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} X_{ijvt}, p \in P, p_d \in P, v \in V, t \in T, p \neq p_d, \quad (18)$$

As Restrições (17) indicam se um produto pode ou não ser transformado em outro. As Restrições (18) limitam a transformação entre produtos a instantes em que o navio está operando. Estas restrições são novas no modelo.

$$\sum_{p \in P} L_{vp,t-1} \geq Dmin_{iv} \sum_{j \in N} X_{ijvt}, \quad i \in N, v \in V, t \in T, \quad (19)$$

$$\sum_{p \in P} L_{vpt} \geq Dmin_{iv} \sum_{j \in N} X_{ijvt}, \quad i \in N, v \in V, t \in T, \quad (20)$$

$$K_v - \sum_{p \in P} L_{vp,t-1} \geq (K_v - Dmax_{iv}) \sum_{j \in N} X_{ijvt}, \quad i \in N, v \in V, t \in T, \quad (21)$$

$$K_v - \sum_{p \in P} L_{vpt} \geq (K_v - Dmax_{iv}) \sum_{j \in N} X_{ijvt}, \quad i \in N, v \in V, t \in T, \quad (22)$$

As Restrições (19) e (20) representam que quando um navio chega ao porto ou sai do porto ele deve respeitar a limitação de calado deste. Similarmente, as Restrições (21) e (22) representam a limitação de calado aéreo. Essas restrições são novas no modelo.

$$\sum_{p \in P} (Ql_{ipvt} + Qu_{ipvt}) \leq R_i, \quad i \in N, v \in V, t \in T, \quad (23)$$

$$L_{vpt} \geq 0, \quad v \in V, p \in P, t \in T, \quad (24)$$

$$Q_{ipt}^{Sinf} \geq 0, \quad Q_{ipt}^{Ssup} \geq 0, \quad i \in N, p \in P, t \in T, \quad (25)$$

$$Qf_{pp_dvt} \geq 0, \quad p \in P, p_d \in P, v \in V, t \in T, \quad (26)$$

$$X_{ijvt} \in \{0, 1\}, \quad (i, j) \in A, v \in V, t \in T, \quad (27)$$

$$W_{ivt} \in \{0, 1\}, \quad i \in N, v \in V, t \in T \quad (28)$$

As Restrições (23) representam a vazão média diária de cada porto. Essas restrições são novas no modelo. As Restrições (24)-(26) representam a não negatividades das variáveis. As Restrições (27) e (28) representam os valores binários das variáveis.

3.2

Métodos de solução aplicados

Buscando avaliar a qualidade das heurísticas para a solução do modelo, foram definidos alguns métodos de resolução para o modelo que posteriormente foram comparados em relação a qualidade da solução e tempo de execução. Foram testados o *Branch-and-Bound* e as heurísticas *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*. As formas utilizadas foram:

- a) *Branch-and-bound* (B&B) – Aplica-se diretamente o *branch-and-bound* no modelo original durante 10800 segundos (3 horas). Após este tempo a resolução é interrompida e é registrada a melhor solução inteira obtida durante a resolução.
- b) *Relax-and-fix* (R&F) – É aplicado o *relax-and-fix* utilizando o conjunto tempo para criar os blocos. O modelo é resolvido deixando-se as variáveis como inteiras apenas nos 10 primeiros dias do horizonte. Os 10 dias seguintes tem as variáveis relaxadas para contínuas. Os demais foram fixados em 0 para todas as variáveis inteiras. Esta primeira etapa pode ser observada na Figura 5.

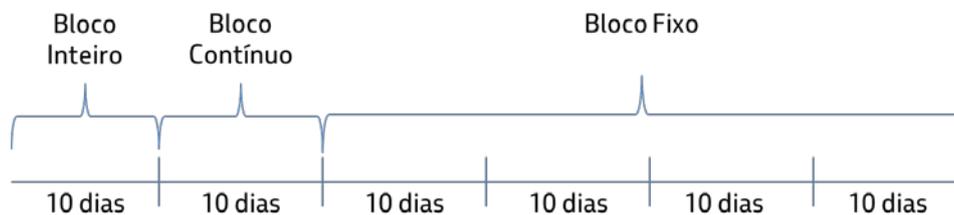


Figura 5 – Primeira etapa do *relax-and-fix* modificado. Utiliza blocos de 10 dias e um bloco fixo ao final.

Fonte: O autor

A escolha do conjunto tempo para compor os blocos foi devido à essa escolha ser a mais imediata. Foi feito um teste com o conjunto navio, que não teve um desempenho bom em tempo de execução. Não foi avaliada a utilização do conjunto porto. Durante os primeiros testes com o conjunto tempo, foi analisado o impacto que teria no resultado e tempo de resolução a variação do tamanho do bloco e optou-se por utilizar os blocos com 10 dias. Além disto, quando o bloco contínuo era maior, o tempo para a obtenção de uma solução inteira aumentava muito. Desta forma optou-se por limitar o tamanho deste bloco em um primeiro momento.

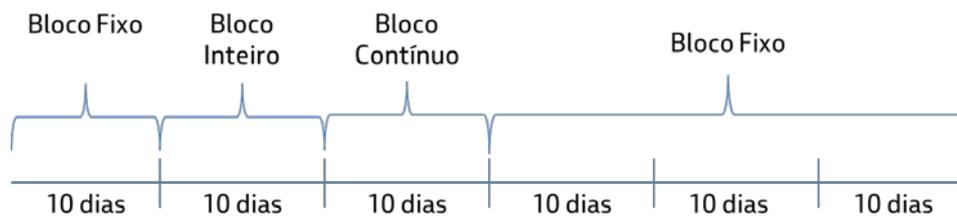


Figura 6 – Segunda etapa do *relax-and-fix* modificado.

Fonte: O autor.

Após a obtenção dos resultados inteiros dos 10 primeiros dias, fixam-se estes valores no modelo como parâmetro. Então os próximos 10 dias têm suas restrições de variáveis inteiras restauradas e os 10 dias seguintes são liberados para assumir qualquer valor contínuo, conforme mostrado na Figura 6. O modelo é então resolvido novamente. A cada iteração mais 10 dias têm suas variáveis inteiras fixadas como parâmetro, mais 10 dias têm a restrição de serem inteiras restauradas e mais 10 dias são liberados para assumir qualquer valor contínuo. As variáveis contínuas do modelo são livres para serem alteradas, mesmo em dias já fixados. O critério de interrupção do modelo para cada iteração é atingir um gap menor que 80% ou depois de 70 segundos de execução. Foi experimentado aumentar o tempo de execução e reduzir o gap antes da interrupção, mas o resultado não melhorou significativamente e o tempo de execução aumentou muito. O processo para quando todas as variáveis voltam a ser inteiras, ou seja, quando as variáveis do último dia do horizonte têm um resultado inteiro.

- c) *Relax-and-fix & fix-and-optimize* (R&F+F&O) – Utilizando o resultado obtido com R&F, aplica-se o *fix-and-optimize* com o objetivo de melhorá-lo. Essa heurística parte de um resultado inteiro qualquer e faz alterações no valor de algumas variáveis inteiras, deixando as demais como parâmetros fixos no modelo, com o objetivo de melhorar o resultado. O conjunto dos navios é utilizado para definir as variáveis inteiras que serão deixadas como fixas e as que ficarão como variáveis. Foram feitos testes utilizando grupos de 2 e de 3 navios para verificar aquele que obtinha o melhor resultado. Assim, foi escolhido utilizar combinações de 2 navios para avaliar possíveis trocas de rotas entre eles, já que esta comparação se mostrou melhor do que o uso de trios.

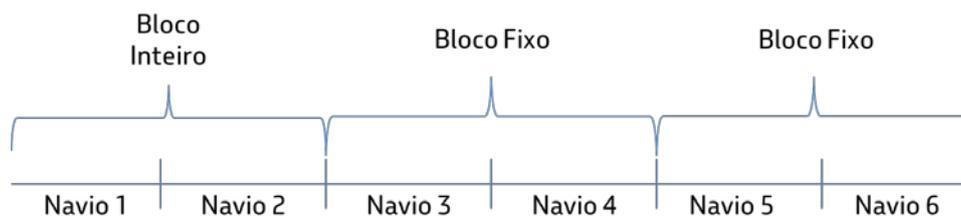


Figura 7 – Primeira etapa do *Fix-and-optimize* utilizando pares de navio.

Fonte: O autor.

Cada navio é avaliado em um único par, para o qual o modelo é resolvido novamente. Considerando um exemplo com 6 navios, os pares seriam 1 com 2, 3 com 4 e 5 com 6, conforme mostrado na Figura 7. Os navios pertencentes ao par escolhido na primeira iteração têm suas variáveis inteiras deixadas livres para serem otimizadas, enquanto os demais têm suas variáveis inteiras fixadas como parâmetros no modelo. Novamente as variáveis contínuas, independente do navio, ficam livres para serem alteradas.

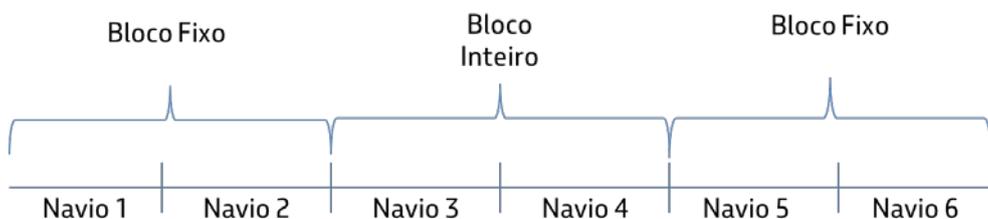


Figura 8 – Segunda etapa do *Fix-and-optimize* utilizando pares de navio.

Fonte: O autor.

Terminada a avaliação do primeiro par, passa-se para a avaliação do próximo, conforme mostrado na Figura 8. O critério de parada de cada otimização é somente por tempo, após 100 segundos de execução. O novo resultado obtido, caso seja melhor que o anterior, substitui o melhor valor das variáveis até o momento. Caso contrário, se a solução permanecer a mesma, mantém-se os valores obtidos anteriormente para cada variável. Quando os pares criados anteriormente forem todos analisados, repetiu-se a análise dos mesmos pares novamente. O objetivo é que, após alteradas as rotas com a primeira passagem, possa haver novas melhorias a serem obtidas com as trocas de rotas. Terminada essa segunda avaliação dos pares, é analisado o melhor resultado obtido. Para cada otimização é

repassado ao *solver* o melhor resultado até o momento, de forma que ele não busque soluções piores que esse.

- d) *Relax-and-fix & fix-and-optimize* com unidade de tempo de 2 dias (R&F+F&O 2D) – Utilizando-se os mesmos dados de cada caso, é feita uma alteração de forma a considerar cada período do horizonte do modelo como 2 dias no lugar de 1. Dessa forma, no lugar de 60 períodos o modelo fica com 30. Para ajustar os parâmetros é necessário alterar apenas as demandas e ofertas de cada produto em cada porto, as distâncias entre os portos, as vazões de carga e descarga e o custo da espera. Os demais parâmetros não precisam de adaptação, devendo permanecer os mesmos. As demandas e ofertas de cada dois dias são acumuladas em cada período. O tempo de navegação entre portos são reduzidos à metade do valor original, ajustando para ficarem como números inteiros. A vazão de operação é dobrada, já que em dois dias pode-se movimentar o dobro do volume de antes. O custo da espera também deve ser dobrado, representando dois dias de espera. A Tabela 6 apresenta alguns exemplos dessa transformação.

Tabela 6 – Exemplo da conversão entre 1 e 2 dias por período no modelo.

Porto de Angra dos Reis	Dias por período	
	1	2
Distância até São Sebastião (em períodos)	2	1
Distância até Rio de Janeiro (em períodos)	5	3
Demanda por Bunker (por período)	3,5	7
Demanda por OCA1 (por período)	1,7	3,4
Vazão de carga (por período)	40	80

Fonte: O autor.

Após a adaptação é aplicado o *relax-and-fix* da mesma forma que antes, mas com 10 períodos de cada vez e com os critérios de parada de cada otimização sendo gap de 80% ou 100 segundos de execução. Então aplica-se o *fix-and-optimize* nos mesmos conjuntos de 2 navios do caso R&F+F&O, sendo apenas uma rodada de otimizações para cada par, com critério de parada de 50 segundos de execução. Após obter a solução dessa forma, é necessário trazer o resultado para o formato original, com 1 dia por período. O tratamento é realizado na variável que representa o

deslocamento de navio, X_{ijvt} , de forma a trazer o resultado de volta a 1 dia por período. Para cada movimentação considera-se que o navio operou no primeiro dia do período permanecendo no porto e operou no segundo dia do período partindo para o porto seguinte. Se o navio, por exemplo, operou no porto A e saiu rumo ao B no período 5, que representa os dias 9 e 10, então é considerado que o navio operou em A, permanecendo em A no dia 9 e operou em A partindo rumo a B no dia 10. Por vezes o navio chega no porto no segundo dia do período. No caso do mesmo exemplo, ele pode chegar no porto dia 10, que ainda seria considerado o período 5 do caso com dois dias por período. Quando isso ocorre, optou-se por deixar apenas a operação no porto A no dia 10 com saída rumo à B. Com as variáveis de movimentação convertidas, fixam-se seus valores no modelo original (1 dia por período) e resolve-se o modelo como linear, já que todas as variáveis inteiras estão fixadas. Desta forma, é obtido o valor da solução convertida, que é usado como limite superior para uma nova rodada de aplicação do *fix-and-optimize*. Com a mesma combinação de 2 navios utilizada anteriormente, aplica-se uma nova otimização para cada par, com critério de parada de cada otimização sendo 100 segundos de execução.

- e) *Relax-and-fix & fix-and-optimize* com todas combinações de navios (R&F+F&O ALL) – Similar ao caso R&F+F&O 2D, mas após a conversão do resultado para 1 dia por período, aplica-se o *fix-and-optimize* para todas as combinações de navios, com critério de parada de 100 segundos de execução por combinação. Ainda com o exemplo de 6 navios, os pares seriam conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Combinação de pares de navios para exemplo com 6 navios.

Pares analisados	
Navio 1	Navio 2
Navio 1	Navio 3
Navio 1	Navio 4
Navio 1	Navio 5
Navio 1	Navio 6
Navio 2	Navio 3
Navio 2	Navio 4
Navio 2	Navio 5
Navio 2	Navio 6
Navio 3	Navio 4
Navio 3	Navio 5
Navio 3	Navio 6
Navio 4	Navio 5
Navio 4	Navio 6
Navio 5	Navio 6

Fonte: O autor.

4

Descrição do Caso

Neste capítulo é apresentado o caso de uma empresa brasileira de petróleo onde se aplicou o modelo proposto. Ela produz petróleo, refina e distribui os derivados até os clientes. Dentro de cada estado o transporte dos produtos é feito por duto, mas o principal transporte interestadual é por navio.

4.1

A movimentação de derivados

O caso é focado na área de distribuição de derivados de petróleo, como gasolina, diesel e óleo combustível, de uma empresa de petróleo brasileira. Essa empresa tem uma área que é responsável por transportar os derivados principais (aqueles de maior volume) dos pontos de produção até os clientes. O transporte é realizado por navios de diversos tamanhos, divididos em três grupos: GLP, claros e escuros. A frota de GLP consiste de navios gaseiros, que transportam propano e butano em tanques pressurizados ou refrigerados. As frotas de claros e escuros são similares, com navios com tanques segregados que transportam os produtos. A necessidade de separação se deve porque os produtos claros, como gasolina, querosene e diesel, têm especificações muito restritas, inclusive para aspecto. Dessa forma não é bom alternar frequentemente entre esses produtos e produtos escuros, como óleo combustível. A grande maioria dos navios é controlado pela empresa, em contratos de afretamento por tempo (TCP – *Time Charter Party*). Durante todo o tempo de duração do contrato a empresa decide o destino e produtos que o navio irá carregar. Os demais navios são contratados para realizar uma única viagem (VCP – *Voyage Charter Party*), com origem, destino e cargas pré-estabelecidas.

4.2

Os produtos escuros

Este trabalho foi focado na frota de navios de escuros, que é responsável por toda movimentação de derivados escuros. O grupo de escuros é composto pelos produtos:

- 1) OCA1/OCB1: Óleo combustível de uso industrial.
- 2) *Marine Fuel*: Óleo combustível para uso de embarcações. Também conhecido como *bunker*.
- 3) OC-CMB: Óleo combustível com controle de metais e baixo teor de enxofre, utilizado para atendimento das termoelétricas.
- 4) Gasóleo de vácuo: Derivado intermediário a ser utilizado pela unidade de craqueamento catalítico. Essa é uma unidade em uma refinaria de petróleo responsável principalmente pela produção de gasolina.
- 5) Diluente: Óleo utilizado para corrigir a viscosidade de outros óleos intermediários de forma a atender os requisitos de qualidade.
- 6) Gasóleo pesado de coque (GOPk): Derivado intermediário que pode ser utilizado como diluente, carga de craqueamento ou exportado.
- 7) OCEX: Óleo combustível com destinação exclusiva à exportação.
- 8) OCMAR: Produto especial de qualidade superior que atende as qualidades de *Marine Fuel* e OC-CMB. Seu excedente também pode ser destinado à exportação. Não existe demanda direta por OCMAR. Seu uso como *Marine Fuel* ou OC-CMB depende da oferta e demanda destes produtos por outros portos, assim como da disponibilidade dos navios.

Somente existem demandas obrigatórias para os 5 primeiros produtos. O OCEX somente possui demanda no exterior, podendo ser exportado para destinos diferentes com preços diferentes, dependendo da qualidade de cada produtor. O GOPk e o OCMAR têm produção, mas não possuem demanda direta. Eles podem ser utilizados para atender a demanda de outro produto que eles atendam a qualidade, conforme detalhado anteriormente.

4.3

Detalhamento da movimentação de escuros

O transporte de produtos escuros ocorre em 16 terminais marítimos nacionais, conforme mostra a Figura 9, e cerca de uma dúzia de portos no exterior. Por simplificação do modelo foram considerados três grupos de terminais estrangeiros. Um representando o golfo americano, outro o norte da Europa e o terceiro o Extremo Oriente. Estes destinos correspondem à grande maioria dos locais de exportação.



Figura 9 – Portos brasileiros com movimentação de derivados escuros.

Fonte: O autor.

Os terminais nacionais podem ser produtores de alguns destes produtos, demandantes de produtos ou uma combinação dos dois. Alguns terminais podem não necessitar enviar nem receber nenhum produto em determinado período. Além disto, durante paradas de produção, terminais que eram produtores podem passar a ser demandantes de determinado produto. Como o óleo combustível é um subproduto, sua oferta varia conforme a necessidade dos demais derivados e não conforme a demanda. Na grande maioria dos meses a empresa produz acima da demanda nacional, sendo necessária a exportação. Eventualmente alguma

qualidade fica com produção inferior à demanda e é necessária importação. Isto ocorre principalmente nos períodos onde há maior despacho de térmicas à óleo.

A frota de escuros conta, na média do período estudado, com 15 navios TCP, que são aqueles afretados por tempo. Os navios em contrato TCP são utilizados para as movimentações nacionais, além de poderem ser utilizados para a exportação e importação. Quando a frota TCP não é suficiente para realizar as movimentações, são contratados navios VCP para complementar. Os VCPs somente podem ser utilizados para atividades de importação e exportação. Isto devido a exigências da legislação nacional. As capacidades dos navios variam de 30 a 100 mil toneladas. Cada navio possui diversos tanques onde segregam os produtos que transportam. Não há restrição ao carregamento combinado de produtos diferentes em tanques distintos. O carregamento de produtos diferentes em um mesmo tanque não é permitido. Quando o tanque está vazio, não há restrição ao carregamento, independente de qual era o produto anterior que o ocupava. O navio não precisa necessariamente navegar cheio, podendo fazer cargas parciais da capacidade. Dependendo das dimensões do navio pode haver restrição para operar em determinados portos. A restrição pode ser completa ou pode apenas restringir a quantidade a bordo do navio durante a entrada e saída, como é o caso das restrições de calado. Essas restrições são significativas e precisam ser consideradas na programação dos navios. Em alguns casos, para aumentar a ocupação dos navios de exportação, são realizados transbordos. O transbordo é uma operação que ocorre em um porto onde um navio transfere produto diretamente para outro, sem passar pelo tanque de terra. Dessa forma, navios menores que não fazem exportação podem carregar produto e depois transferi-los para um navio maior, que irá realizar a operação.

Apesar do planejamento ser focado nas primeiras semanas de roteirização dos navios, é importante avaliar o seu impacto em um período superior. A exportação para Cingapura é uma rota muito comum, tendo o tempo de ida e volta do navio próximo a dois meses. Como parte da exportação é feita em navios controlados pela empresa e a legislação proíbe o uso de navios com tripulação estrangeira para movimentações nacionais, é necessário este horizonte ampliado para saber se a exportação realizada em navio TCP não impactará o atendimento do mercado no segundo mês, enquanto ele não retorna. Por outro lado, como o contrato de um navio TCP dura de 1 a 5 anos, o navio terá seu aluguel pago sendo

utilizado ou não. Deixá-lo parado enquanto exporta com um navio VCP representa um custo extra.

A previsão de produção destes produtos é bem acurada, assim como a maioria do mercado. A exceção é o mercado de térmicas. Este é muito difícil de prever, apresentando erros superiores a 50% do previsto. Atualmente essa incerteza não é considerada no planejamento das rotas dos navios e nem será abordada no decorrer deste trabalho. Para todas as ofertas e demandas foram consideradas taxas determinísticas e lineares, ou seja, igualmente distribuída dentro do período. Porém a taxa pode variar de um período para o outro, como, por exemplo, quando muda o mês.

4.4

O modelo atual

Para melhorar a programação dos navios e reduzir os custos com transporte, foi desenvolvido pela empresa um sistema de apoio a decisão para programar os navios. Devido a questões de sigilo empresarial, o modelo utilizado atualmente não poderá ser mostrado em detalhes. Somente serão discriminadas suas entradas, considerações e saídas.

O modelo atual tem como objetivo gerar uma programação para os navios. Isto inclui a sequência de portos que cada navio irá seguir, com suas datas de chegada e saída, bem como as quantidades que serão transportadas entre os portos de carga e descarga nessas movimentações. Essa programação é gerada de forma a minimizar os custos de transporte (combustível, taxas portuárias, custos tributários), atendendo as necessidades de escoamento da produção e atendimento da demanda. Por decisão da equipe de desenvolvimento, o modelo foi dividido em duas etapas. A primeira com o objetivo de definir os lotes (cargas com quantidade, origem, destino e datas) e a segunda que aloca os navios para movimentá-los. A seguir são apresentadas em maiores detalhes.

4.4.1

Primeira etapa

A primeira etapa do modelo atual tem por objetivo gerar os lotes de movimentação de cada produto entre os portos. Ela não possui informações relacionadas aos navios e controla os estoques de cada produto em cada porto, baseado no estoque inicial, na demanda e oferta diária, nos tempos e custos de movimentação entre os portos. Para isso utiliza um modelo de programação inteira mista, com objetivo de minimizar os custos de movimentação e da penalização por violar o estoque (negativo ou maior que a capacidade).

Com base na data ótima gerada para cada lote pelo modelo, são estabelecidas faixas de carga e descarga em uma etapa de pós processamento. As faixas de carga são estabelecidas olhando o estoque dos locais e verificando a partir de que data já tem a quantidade do lote e até que data não estoura a capacidade de armazenagem. Da mesma forma, para os portos de destino, verifica a data a partir da qual já possui espaço para descarga e até que data não gera falta de estoque.

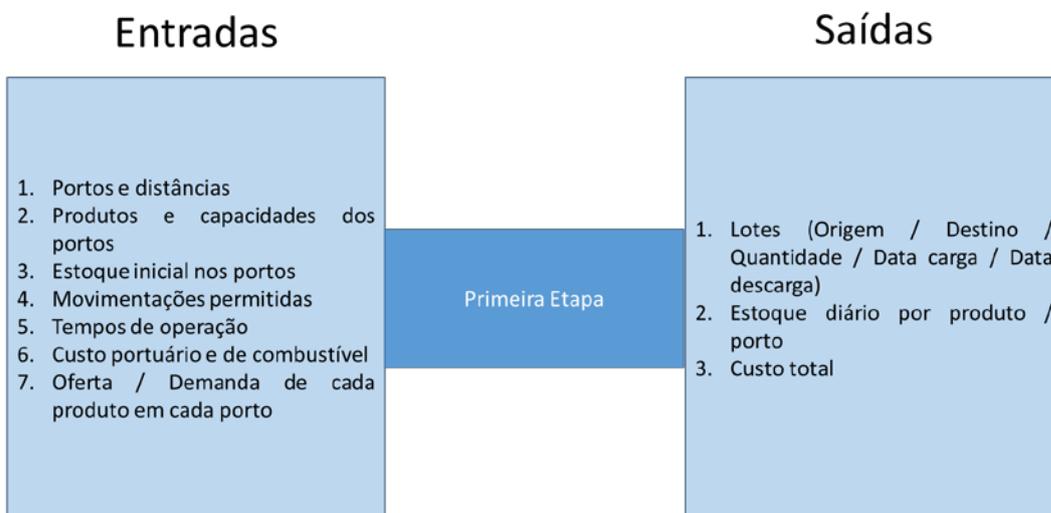


Figura 10 – Entradas e saídas da primeira etapa do modelo.

Fonte: O autor.

4.4.2

Segunda etapa

A segunda etapa define as rotas dos navios, com datas de chegada e saída de cada porto e produtos carregados e descarregados. Para isso ela considera os lotes e faixas definidas na primeira etapa, assim como a posição e características de cada navio disponível. O modelo não considera os estoques iniciais em navios, considerando eles como vazios na data informada como disponível. Os lotes definidos na primeira etapa podem ser ajustados pelo usuário do sistema, podendo ter qualquer dos parâmetros alterados, como origem, destino e datas.

Este modelo utiliza uma heurística, baseada em algoritmos genéticos para obter sua solução. O objetivo é programar os navios de forma a minimizar o custo de transporte e da penalização de violar as faixas de carga e descarga definidas.

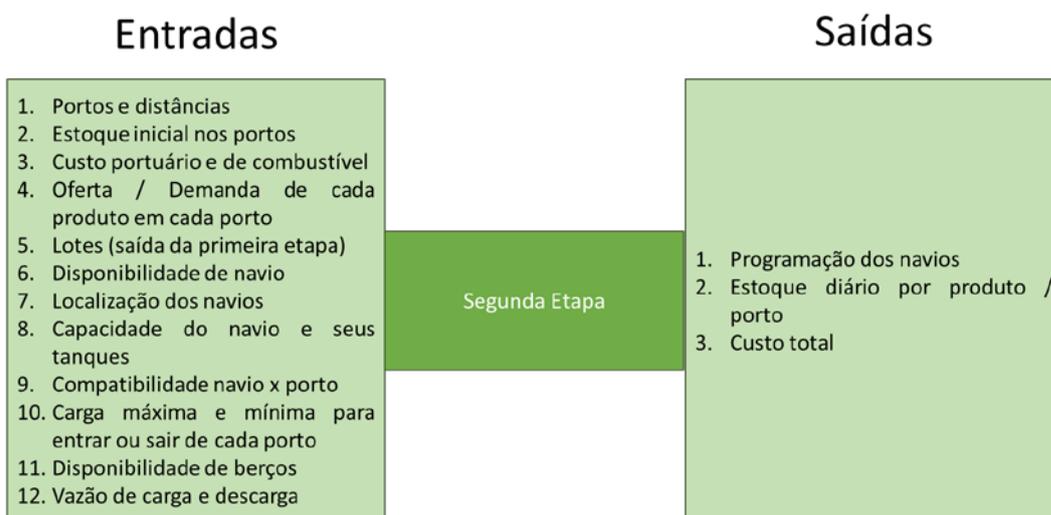


Figura 11 – Entradas e saídas da segunda etapa do modelo.

Fonte: O autor.

4.4.3

Avaliação do modelo

De uma forma geral, o modelo representa bem as características relevantes da programação de navios. Porém, os resultados diretos gerados por ele não representam uma programação factível, que atenda os clientes e escoe a produção. Para utilizá-lo é necessário realizar diversas intervenções manuais nos dados de saída da primeira etapa (lotes) para se obter um resultado melhor na segunda

etapa. Isto ocorre principalmente pelo fato da primeira etapa não “enxergar” os navios, apenas as necessidades de movimentação. Os principais problemas que dificultam seu uso, sem alteração manual da programação, são:

- a. O modelo não considera os estoques iniciais em navio, ou seja, quanto de cada produto o navio possui a bordo no início do horizonte. Ele considera apenas os estoques iniciais em portos. Dessa forma, ele pode indicar que o navio carregue mais produto do que ele tem espaço de fato ou deixar falhar um atendimento mesmo com um navio ao lado com produto disponível. Para contornar este problema, é fixada a rota de cada navio até que ele fique vazio. Cada descarga prevista do navio é inserida no modelo como uma oferta para a data da operação e o navio só é considerado disponível após a data de sua última descarga. Para alguns navios, isto significa ter mais de um mês pré-definido.
- b. A primeira fase não leva o posicionamento dos navios em consideração na hora de definir o destino dos produtos carregados. Isso implica que ela pode indicar a movimentação para um destino para o qual o navio disponível não pode ir por alguma restrição. Como exemplo podemos considerar a indicação de uma exportação a partir de um porto logo nos primeiros dias do horizonte. O navio mais próximo apto a essa operação está a muitos dias de distância. Por outro lado, teria um outro navio disponível para levar o produto na data adequada, caso o destino do produto fosse o mercado nacional.
- c. A primeira fase não considera a quantidade de navios. Isso significa que é permitido realizar qualquer quantidade de movimentações. Às vezes o modelo gera fluxos desnecessários, principalmente de exportação, que gera receita. Quando a segunda etapa tenta seguir o volume indicado na primeira, não há capacidade de navios para atendê-la. Outras vezes o que ocorre é a concentração de exportações no início do horizonte, consumindo todos os navios que fariam outras operações.
- d. A primeira fase não consegue fazer uma contrapartida entre os diversos destinos de exportação. O ideal seria o modelo avaliar se é melhor ganhar mais dinheiro exportando para mais longe, mas ficando mais tempo sem o navio, ou ganhar menos na exportação e ter o navio de volta rapidamente. Como o destino da exportação é decidido sem levar em conta a

disponibilidade de navios, caso não seja inserida uma limitação arbitrária de movimentação para cada destino, todo o volume é exportado para o local onde ele tem maior valor.

- e. O modelo não considera a possibilidade de transbordo, isto é, transferência de um produto diretamente de um navio para outro, sem passar pela armazenagem de terra. Essa operação é frequentemente utilizada no mundo real, mas ela não foi modelada. O transbordo dá a flexibilidade de carregar produtos em navios menores e depois transferir para um maior que faria a movimentação em trechos mais longos, como uma exportação.

Para contornar essas questões, o programador intervém nas premissas e resultados, de forma a conseguir uma solução viável com o uso da ferramenta. Essa intervenção vai desde fixar a sequência de descargas até que o navio esteja livre, até alterar manualmente os lotes gerados na primeira etapa. Muitas vezes é necessário um processo de ajustes. Altera-se alguns lotes, realiza a segunda etapa e avalia. O resultado continua não satisfatório, retorna ao início e altera outros lotes. Segue nesse processo até chegar a uma solução adequada. O excesso de intervenções, além de demorado, obriga o programador a realizar as decisões pelo modelo.

4.5

Utilização do modelo proposto

Com o objetivo de superar os problemas expostos no item anterior, buscou-se aplicar o modelo proposto no Capítulo 3 ao caso da empresa. Utilizou-se dados reais de 10 meses diferentes, criando um cenário para cada mês. Cada cenário tem o horizonte de 2 meses, contendo as informações de estoque, ofertas e demandas referentes ao plano do mês.

Para o custo de movimentação, foram considerados o consumo de combustível diário do navio, multiplicado pelos dias de viagem e o preço médio do combustível. Os custos portuários não foram considerados, apesar do modelo permitir, pela dificuldade de obtê-los e pelo fato de não impactarem na avaliação do modelo. Para uma eventual utilização de fato do modelo pela empresa seria necessário incluir essa parcela. Para o custo de espera foi considerado apenas o consumo de combustível em espera. O custo de aluguel do navio não foi

considerado, pois no curto prazo ele é considerado custo fixo e não altera o resultado do modelo.

Para determinar quais arcos de navegação cada navio pode fazer foi criada uma tabela de compatibilidade de navio e porto. Todos os portos que o navio pode ir tiveram arcos criados para todos os demais dessa mesma lista. As distâncias entre os portos foram obtidas de sistemas de programação de navios da própria empresa. Para cada navio foi considerada a velocidade econômica de contrato.

O primeiro destino para o navio a partir do porto artificial de origem poderia ser apenas o destino já estabelecido para o navio quando da realização do planejamento ou o porto de destino artificial, caso o modelo optasse por não utilizar esse navio. Para permitir a operação de um navio no primeiro dia do horizonte criou-se no modelo o dia 0. Assim, permitiu-se que o navio pudesse operar já em um porto real no dia 1 do horizonte. Da mesma forma, foi criado um dia extra ao final do horizonte para permitir que um navio operasse no último dia antes de ir para o destino artificial.

Os estoques iniciais e capacidades dos navios e dos terminais portuários foram obtidos de sistemas operacionais da empresa. Optou-se por considerar como limites superior de estoque em terra a capacidade de armazenamento de cada produto e como limite inferior o valor zero. O custo de violação dos estoques foi o mesmo em todos os produtos, em todos os portos e para todo o horizonte.

Apesar do modelo permitir a operação em múltiplos berços e os portos trabalhado possuem mais de um, foi considerada apenas um berço disponível por porto. Como os dados não contemplam os demais navios que operam nestes portos, foi considerado que os demais estariam sempre ocupados por estes navios não considerados.

Alguns portos tinham a vazão bem estável, enquanto outros tinham uma variação grande. Foi considerado a média diária de carga e descarga como a quantidade diária máxima de produto que o navio pode movimentar no porto. Essa restrição se faz necessária devido à estrutura do porto não permitir que os navios operem em suas vazões de projeto.

A exportação é uma operação que não é necessária atender. Atendido o mercado nacional, o produto excedente é destinado à exportação. Desta forma, os portos de exportação não têm demanda obrigatória. Como são portos distantes, com maior consumo de combustível para chegar até eles, não há interesse natural

do modelo em utilizá-los. Assim, é necessário inserir um ganho unitário por volume descarregado, que representa a receita com a exportação, para que o navio opere nesses portos. A capacidade considerada para cada produto nesses terminais foi a quantidade máxima de exportação para essa frente.

Para o tempo de exportação foi necessário um tratamento especial devido ao longo período de viagem. Muitas das vezes não há tempo no horizonte para concluir a viagem de ida e muito menos a de volta. Isto levaria o modelo a não avaliar corretamente essa operação, visto que o modelo necessita que o navio termine a viagem no destino artificial. Para contornar esse problema, os portos no exterior foram duplicados no modelo, conforme mostrado no exemplo da Figura 12.

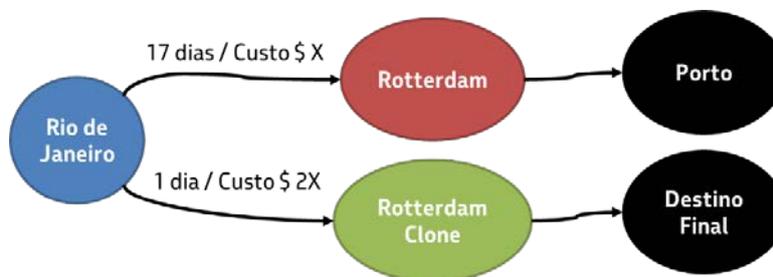


Figura 12 – Exemplo da utilização de portos clone para avaliação da exportação.

Fonte: O autor.

O original tem todos os seus custos e tempos de movimentação normais, mas não pode ser o último porto que o navio utiliza antes de ir para o destino artificial. A cópia tem tempo de ida de 1 dia, e custo de trecho que vale o dobro do custo normal. Neste caso o navio não pode retornar, sendo obrigatório se deslocar para o destino artificial. Essa modelagem impede que o modelo considere que o custo da exportação seja apenas a perna de ida, subestimando esse valor. Também permite que o modelo indique que um navio se dirija para um porto no exterior mesmo que saia do porto de carga próximo ao fim do horizonte, o que não seria possível quando o horizonte restante fosse menor que a quantidade de dias necessários para a viagem.

5

Resultados obtidos

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação do modelo em 10 cenários reais baseados no caso apresentado. Cada cenário representa um mês diferente de planejamento.

5.1

Aplicação do modelo

O modelo foi resolvido utilizando o software AIMMS, versão 4.51 e o solver GUROBI 7.5. Foi utilizado um computador com processador Intel Core i7-3520M, com CPU de 2.9 GHz e 8 GB de memória RAM.

Utilizando os dados de planejamento para 10 meses, de agosto de 2017 a maio de 2018 o modelo foi resolvido conforme os métodos apresentados no Capítulo 3: Branch-and-Bound (B&B), Relax-and-fix (R&F), *Relax-and-fix & fix-and-optimize* (R&F+F&O), *Relax-and-fix & fix-and-optimize* com unidade de tempo de 2 dias (R&F+F&O 2D) e *Relax-and-fix & fix-and-optimize* com todas combinações de navios (R&F+F&O ALL). Cada um dos 10 cenários apresenta horizonte de 60 dias e representa o planejamento das movimentações de cada mês.

Tabela 8 – Resultados obtidos para cada cenário e tempo de execução.

Cenário	B&B		R&F		R&F+F&O		R&F+F&O 2D		R&F+F&O ALL	
	Resultado	Tempo	Resultado	Tempo	Resultado	Tempo	Resultado	Tempo	Resultado	Tempo
mai/18	208,3	10800	447,4	441	9,7	2300	8,1	1550	5,6	10502
abr/18	744,4	10800	245,7	385	32,9	1929	7,6	1443	5,5	7787
mar/18	679,4	10800	721,1	323	49,6	1880	15,9	1388	7,4	8490
fev/18	427,9	10800	480,9	337	13,2	2165	9,0	1529	5,9	8815
jan/18	640,3	10800	600,6	345	11,7	2346	11,7	1713	8,6	9222
dez/17	584,7	10800	712,5	310	133,3	1958	12,9	1542	6,1	10014
nov/17	1026,3	10800	522,3	326	55,8	1987	42,7	1349	21,0	11190
out/17	421,1	10800	570,2	380	10,2	2397	10,8	1569	7,2	9170
set/17	629,0	10800	541,7	368	10,9	2384	13,4	1766	10,3	11658
ago/17	601,4	10800	523,1	374	18,2	2332	22,3	1732	6,2	10670

Fonte: O autor.

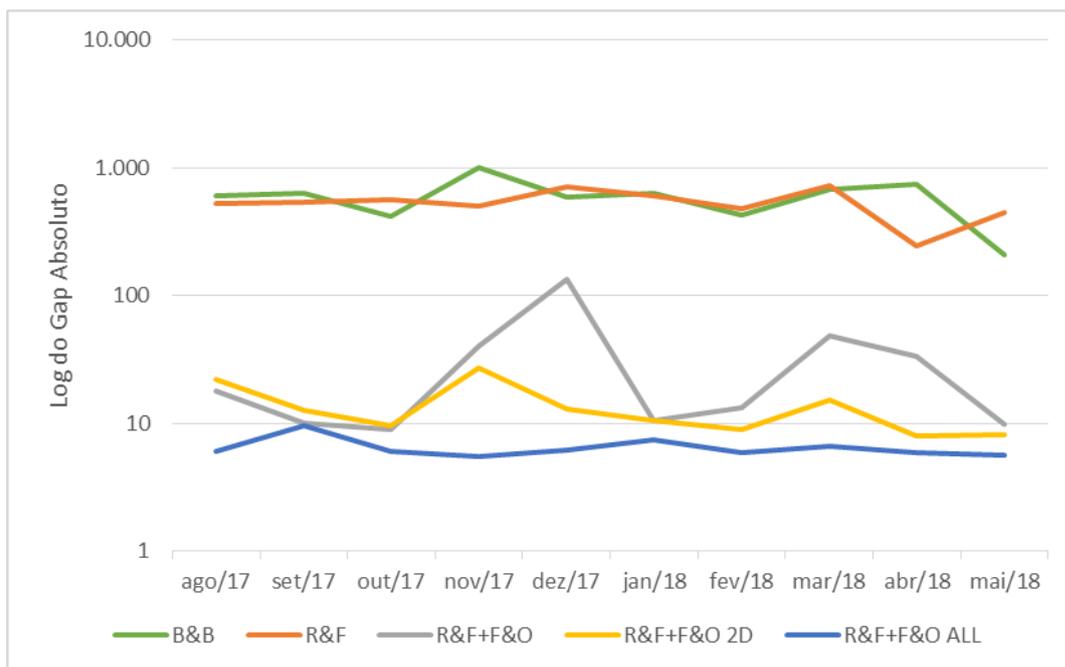


Figura 13 – Resultados do modelo. Logaritmo dos gaps absolutos de cada cenário.

Fonte: O autor.

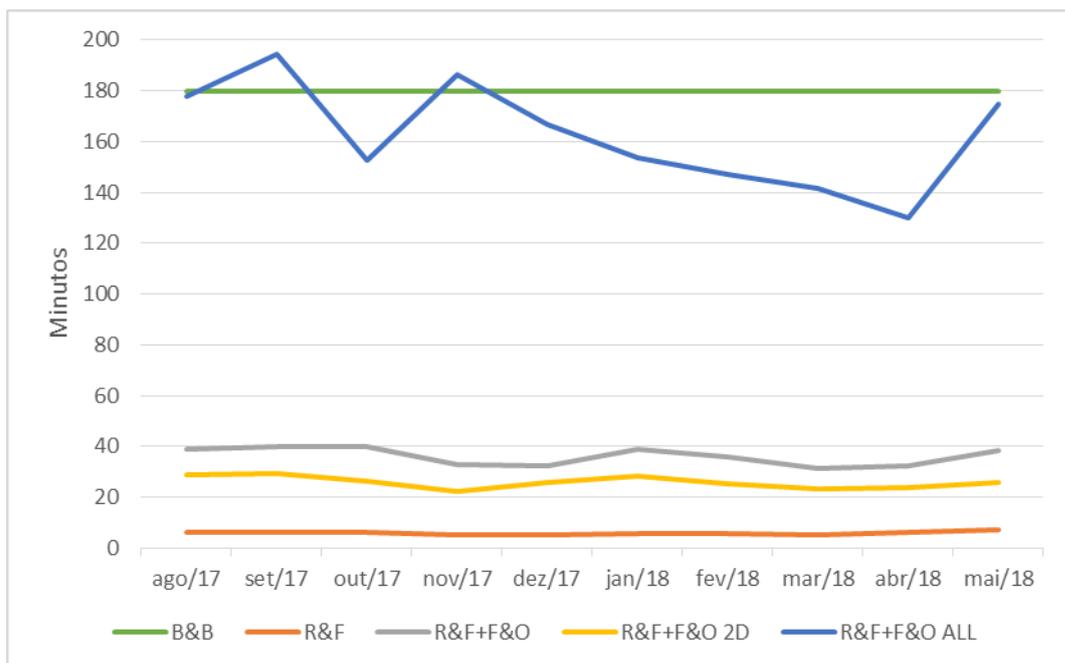


Figura 14 – Tempo de duração de cada método em minutos.

Fonte: O autor.

Os resultados para cada cenário por cada método estão apresentados na Figura 13 e o tempo de duração, em minutos, estão apresentados na Figura 14. Os mesmos valores são apresentados na Tabela 8. Como não foi possível obter ou pelo menos provar a obtenção da solução ótima do modelo para nenhum dos casos, a qualidade da solução foi apresentada utilizando o gap em valores

absolutos entre o resultado obtido pelo método e o limite inferior do B&B no momento da interrupção, após as 3 horas de execução. Devido à grande diferença entre os valores, foi utilizada uma escala logarítmica.

Analisando as soluções foi constatado:

(1) o resultado do modelo pelo método B&B foi o pior para a maioria dos cenários, apesar de ter sido disponibilizado o maior tempo de resolução. O único método com resultados comparáveis foi o R&F, que obteve resultados próximos em apenas 6 minutos;

(2) os resultados obtidos com o *relax-and-fix* constataram que ele não foi capaz de gerar uma solução satisfatória. Mesmo em testes realizados com tempo de resolução maior e variação na quantidade de dias do bloco. Os resultados obtidos foram muito ruins, com vários desvios de estoque. Dessa forma a validade desse método foi de entregar uma primeira solução viável com alguma qualidade de forma rápida para utilização na heurística seguinte;

(3) por ter optado em deixar a gestão de estoques do modelo por penalização na função objetivo quando se violava os limites, no lugar de restrição, o modelo nunca é inviável. Dessa forma não é necessário o processo de retornar a etapa anterior no *relax-and-fix* caso encontre um resultado inviável, conforme utilizado pelos demais autores que utilizaram o método (Dillenberger et al., 1994; Diz et al., 2017). Essa possibilidade só será vantajosa caso seja aplicado posteriormente o *fix-and-optimize* ou outra heurística de melhoria de solução, já que o resultado do *relax-and-fix* possuirá muitas falhas de estoque;

Tabela 9 – Excesso de estoques na solução de um cenário.

Excesso de estoque		Dia				
Porto	Produto	4	5	6	9	36
ITAQUI	OC-CMB					0,97
SUAPE	GOPk	0,08	1,85	3,62		
SALVADOR	OCMAR				1,08	

Fonte: O autor.

(4) A Tabela 9 representa as falhas de estoques encontradas em um dos cenários, utilizando o método R&F+F&O 2D. As falhas de Itaquí e Salvador representam apenas um dia pontual de excesso de estoque. Como solução pode-se negociar uma postergação da produção, ou o envio do navio em velocidade maior

para retirada antecipada do produto. No caso de Suape, as falhas ocorrem logo no início do horizonte e são inevitáveis por movimentação marítima, já que o navio que retirou o produto era o mais próximo ao porto. Nesse caso, as alternativas seriam tentar postergar a produção ou, caso não fosse possível, reduzir a carga da refinaria. Se o controle de estoque fosse inserido como restrição, o cenário seria inviável, independentemente do método de solução utilizado.

(5) o *fix-and-optimize* foi capaz de melhorar muito o resultado obtido pelo *relax-and-fix*. A aplicação do método diretamente no modelo com período de 1 dia, no entanto, não foi capaz de apresentar soluções boas para 6 casos. Continuar a aplicar o método, com outras combinações de navios, consegue melhorar ainda mais a solução, ao custo de maior tempo de execução;

(6) devido à forma de representar o atendimento aos estoques no modelo, foi realizado um outro teste, que consiste em usar como solução inicial para o *fix-and-optimize* a não movimentação de nenhum navio. Essa solução tem o pior resultado possível, já que todos os locais apresentam falhas de estoque. O objetivo do teste era avaliar se era possível “economizar” o tempo do *relax-and-fix* na busca por uma solução. O resultado foi que o resultado obtido era pior que o R&F+F&O, e o tempo economizado foi muito pouco. Dessa forma descartou-se essa possibilidade e validou-se a utilidade do *relax-and-fix*.

(7) o método de usar o modelo com período de 2 dias para obter a primeira solução e depois transformá-la de volta para 1 dia por período (R&F+F&O 2D) apresentou desempenho superior à aplicação do *relax-and-fix* mais o *fix-and-optimize* diretamente no modelo com período de 1 dia (R&F+F&O). Além de gastar menos tempo ele conseguiu obter resultados, em média, melhores. Os resultados obtidos dessa forma foram muito bons em 6 casos;

(8) as desvantagens de dobrar o período são que uma melhoria na solução no cenário dobrado pode não significar uma melhoria no caso original quando convertido de volta, além de propiciar uma menor flexibilidade de movimentações possíveis, limitando o resultado. Como exemplo temos que o modelo com período de 2 dias pode atender a demanda do dia 7 com um navio que chega dia 8, por estarem no mesmo período. Por outro lado, não teria como o navio operar só no dia 7 em um porto e partir para o próximo. Devido a essas limitações optou-se por fazer a última passagem do *fix-and-optimize* no modelo já convertido para o período de 1 dia, de forma a tentar minimizar estes problemas na solução final;

(9) em testes realizados com os cenários concluiu-se que tentar aprimorar a solução do caso com período dobrado, fornecendo mais tempo ou mais combinações de navios, também apresenta melhor desempenho tanto de execução quanto de resultado do que a mesma iniciativa no modelo com 1 dia por período. Ainda assim é recomendado a aplicação do *fix-and-optimize* após a conversão da solução do modelo de 2 dias por período para o original, com o objetivo de tentar minimizar os efeitos negativos apresentados anteriormente;

(10) O último caso avaliado, com a utilização de todas as combinações conseguiu melhorar ainda mais a solução. Porém o tempo necessário para testar todas as possibilidades foi muito longo. Em alguns testes foi possível constatar que a ordem das avaliações impacta na rapidez de melhora da solução. Dessa forma, poderia ser investigado se existe uma ordem específica de avaliação dos pares de navios, igual para todos os cenários, que permitiria chegar ao mesmo resultado final sem a necessidade de passar por todas as combinações. Ou se existe vantagem em avaliar primeiro aqueles navios cuja disponibilidade seja maior;

(11) como já adiantado no Capítulo 3, foram feitos testes considerando utilizar trios de navios no *fix-and-optimize* no lugar dos pares. Quando aplicado dessa forma no modelo com 1 dia por período o resultado foi muito inferior ao obtido com os pares. Já para o caso de aplicar no modelo com 2 dias por período para alguns cenários obteve-se um resultado melhor, mas na maioria também não apresentou ganho.

Após a avaliação da comparação dos resultados numéricos entre os métodos, analisou-se a qualidade dos resultados obtidos para indicar os roteiros dos casos reais apresentados. De forma geral, o modelo conseguiu obter um bom resultado, mantendo os estoques dentro dos parâmetros definidos e gerando uma programação de rotas adequada para os navios. A exceção foi o caso do mês de novembro/17, que nem mesmo a solução do R&F+F&O ALL conseguiu obter uma solução sem falhas graves de estoque. Acredita-se que mesmo a solução ótima deste caso não conseguiria atender todos os estoques e que seria necessário a contratação de outros navios VCP de forma a obter uma solução boa para aplicação no mundo real. Para os demais casos o resultado poderia ser aplicado diretamente. Considerando o resultado obtido pelo método R&F+F&O 2D, que estaria com um tempo de duração menor teríamos apenas 6 meses com resultados

bons e diretamente aplicáveis em até 30 minutos de execução do modelo. Expurgando o caso de novembro/17, que não tinha solução adequada com as premissas passadas, seriam 66,7% dos casos com solução aplicável neste tempo.

O resultado do modelo supera grande parte das dificuldades apresentadas pelo modelo atualmente utilizado pela empresa, como os estoques de abertura em navio e o volume e destino das exportações. Apenas a parte dos transbordos continuou não sendo contemplada. Apesar de apresentar essas vantagens, o modelo proposto tem algumas desvantagens em relação ao sistema atual. Ele trata os dados temporais com um nível menos detalhado. Por exemplo, ele não trata o tempo de operação e de viagem de forma a considerar as frações de dias. Além disto, ele não faz o correto uso das segregações nos navios, o que ocorre no sistema atual. Por fim, o tempo para obter a solução também ficou maior, se for considerado apenas os tempos de execução do modelo, descartando as intervenções manuais. A comparação entre os dois modelos dos custos das programações sugeridas não foi possível de ser realizada. Em vários testes feitos, o resultado obtido no modelo atual apresentava sempre falhas significativas de estoque, mesmo quando se verificou pelo resultado do modelo proposto que existia uma solução que atendia os estoques. Devido à alta penalização por falha de estoques, o “custo” fica muito superior no modelo atual, ficando apenas melhor que os resultados obtidos em B&B e R&F.

A utilização da heurística *fix-and-optimize* também permite avaliar o impacto no resultado de alterações nos dados de entrada de forma rápida e fácil. Para avaliar o impacto da contratação de um navio extra (VCP), basta inseri-lo na melhor solução até o momento, com rota indo da origem artificial para o destino artificial. Depois aplica-se o *fix-and-optimize* deixando este navio ser avaliado junto aos demais e verificar se ele é utilizado. O navio VCP tem um custo de utilização superior ao TCP já contratado. Dessa forma, ele só será utilizado se for necessário para evitar alguma violação de estoque. Também pode ser avaliada a mudança de algum parâmetro, como, por exemplo, um aumento de 20% na produção ou da demanda de algum porto. Partindo da solução inicial o modelo irá avaliar se realiza ou não alguma alteração nas rotas e volumes.

6

Conclusão

Este trabalho buscou trazer um modelo que fosse capaz de resolver o problema real de uma empresa brasileira de petróleo para movimentação de derivados escuros. Foi utilizado um modelo MIR com uma frota heterogênea para realizar o transporte de múltiplos produtos. O modelo deveria permitir a transformação entre os produtos e realizar o atendimento de demandas obrigatórias e opcionais. Para atender este objetivo foi realizada uma adaptação do modelo com tempo discreto proposto por Chistiansen et al. (2013), como a inclusão de múltiplos produtos, a mudança de restrição de estoques para penalização na função objetivo, a possibilidade de transformação entre produtos e a modelagem das restrições de calado dos portos. O modelo apresentado conseguiu representar essas características de forma adequada. Sobre a forma de controlar os estoques, por restrição ou por penalização, foram mostradas as vantagens de se utilizar esta segunda. Algumas das falhas podem ser desprezadas, ou então mitigadas por ações externas ao modelo. Além disso, permite o uso das heurísticas de forma mais rápida.

Foram testados 10 cenários reais baseados em dados de 10 meses diferentes de planejamento, com horizonte de 60 dias. O modelo proposto foi capaz de fornecer uma programação válida para o problema, mostrando sua capacidade de resolver problemas grandes do mundo real. O modelo foi capaz de superar as principais deficiências do modelo atualmente utilizado na empresa de forma a prover uma solução mais adequada à aplicação. Como contrapartida ele tem um tempo de execução maior, levando mais tempo até chegar à solução e é menos preciso no controle dos tempos de navegação e operação, já que permite apenas operações de um dia inteiro. A modelagem de transbordo entre navios não foi tratada, sendo necessário um estudo mais aprofundado para resolver essa questão.

Para resolver o modelo proposto foi demonstrado que a utilização das heurísticas *relax-and-fix* e *fix-and-optimize* apresentou uma melhor resposta que a busca pela solução ótima, dentro de um prazo reduzido de até 3 horas. Foi

mostrado também que a aplicação da heurística primeiro num cenário com período de 2 dias e posteriormente convertendo para o período de 1 dia permite obter resultados mais rápidos e, em média, melhores do que aplicar a heurística diretamente no modelo com o período de 1 dia. Não foi possível obter a solução ótima, mas o resultado obtido aplicando a heurística a todas as combinações de navios se mostrou muito bom. Como contrapartida essa busca exaustiva se mostrou pouco eficiente, levando algumas horas para concluir. Muitas das combinações pouco contribuíram para a melhora do resultado e acredita-se que poderia ser estudado um conjunto de combinações entre os navios que seriam suficientes para obter uma boa resposta em um menor tempo.

O modelo proposto ainda não foi apresentado aos gestores da empresa. É esperado que, visto seu desempenho superior ao atual, ele seja utilizado de forma integral, ou parte de suas ideias sejam incorporadas ao modelo existente. Independente do caminho, espera-se uma economia nos custos de movimentações e/ou uma redução nas falhas de atendimento.

6.1

Trabalhos futuros

A modelagem da roteirização de navios é um tema com crescente interesse por parte dos pesquisadores. Como o tempo de resolução continua sendo um dos principais problemas de modelos inteiros acredita-se que não se tenha um modelo único, aplicável para qualquer caso. Cada aplicação deve levar em conta quais são os fatores relevantes para que questões menores não afetem o desempenho da solução. Ainda assim, a contribuição dos modelos dos diversos pesquisadores, mesmo que não tenha aplicação direta em um determinado caso, é importante para o desenvolvimento de um material de base para novos modelos. Dessa forma acredita-se que novos estudos de aplicações de roteirização de navios em casos reais têm muito a contribuir para essa ciência.

Dentre os problemas estudados que não se conseguiu ir a fundo propõe-se uma adaptação do modelo proposto juntando com as alterações sugeridas por Agra et al. (2013) no seu modelo FCNF com desigualdades válidas. Espera-se que o tempo de resolução dessa forma seja reduzido conforme mostrado por Diz et al. (2017) no seu estudo comparativo para o modelo base. Outra questão que não

pôde ser verificada foi a adaptação do modelo proposto para a realização de transbordos entre navios em terminais. Essa é uma característica importante do problema real estudado, mas que não foi contemplada no modelo apresentado. Também seria interessante avaliar o impacto que a variação da demanda de óleo para térmicas tem na roteirização. Como essa demanda é muito difícil de prever, uma análise mais detalhada poderia trazer grandes ganhos. Por fim, poderia ser avaliado o desempenho das heurísticas apresentadas para resolução de casos ainda maiores ou a apresentação de novas heurísticas para estes casos. Considerando o caso estudado poderia ser avaliado conjuntamente, por exemplo, as necessidades de movimentação de derivados escuros, claros, GLP, além do petróleo, visto que todas as frotas compartilham ativos como berços. Neste cenário, além de ter uma quantidade de portos e navios maior, será necessária uma restrição de quais produtos cada navio pode ou não carregar em conjunto, além de considerar um tempo e custo de limpeza de tanques quando houver mudança de produtos mais sensíveis.

Referências bibliográficas

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**, v. 176, n. 1, p. 106-130, 2007.

AGRA, A.; ANDERSSON, H.; CHRISTIANSEN, M.; WOSLEY, L. A maritime inventory routing problem: Discrete time formulations and valid inequalities. **Networks**, v. 62, n. 4, p. 294-314, 2013.

AGRA, A.; CHRISTIANSEN, M.; DELGADO, A. Mixed integer formulations for a short sea fuel oil distribution problem. **Transportation Science**, v. 47, n. 1, p. 108-124, 2013b.

AGRA, A.; CHRISTIANSEN, M.; DELGADO, A.; HVATTUM, L.M. A maritime inventory routing problem with stochastic sailing and port times. **Computers & Operations Research**, v. 61, p. 18-30, 2015.

CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; FLATBERG, T.; HAUGEN, O.; KLOSTER, O.; LUND, E.H. Maritime inventory routing with multiple products: A case study from the cement industry. **European Journal of Operational Research**, v. 208, n. 1, p. 86-94, 2011.

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.; ESCUDEIRO, L.; WOLLENSAK, A.; ZHANG, W. 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.

DIZ, G.; HAMACHER, S.; OLIVEIRA, F. Maritime Inventory Routing: a practical assessment and a robust optimization approach. **PUC-RJ**, 2017.

FURMAN, K.C.; SONG, J.-H.; 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.

GINTNER, V.; KLIEWER, N.; SUHL, L. Solving large multiple-depot multiple-vehicle-type bus scheduling problems in practice. **OR Spectrum**, v. 27, n. 4, p. 507-523, 2005.

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

PERSSON J.A.; GÖTHE-LUNDGREN, M. Shipment planning at oil refineries using column generation and valid inequalities. **European Journal of Operational Research**, v. 163, n. 3, p. 631-652, 2005.

SISWANTO, N.; ESSAM, D.; SARKER, R. Solving the ship inventory routing and scheduling problem with undedicated compartments. **Computers & Industrial Engineering**, v. 61, n. 2, p. 289-299, 2011.

SONG J.H.; FURMAN K.C. A maritime inventory routing problem: Practical approach. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 3, p. 657-665, 2013.