



Adriano Roberto Bergmann

**Roteamento de Navios no Processo de Alívio
de Plataformas de Petróleos para Exportação**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Rafael Martinelli Pinto

Rio de Janeiro
Setembro de 2020



Adriano Roberto Bergmann

**Roteamento de Navios no Processo de Alívio
de Plataformas de Petróleos para Exportação**

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

Prof. Rafael Martinelli Pinto

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Matheus Nohra Haddad

Universidade Federal de Viçosa – Minas Gerais

Prof. Gustavo Souto dos Santos Diz

Petróleo Brasileiro S.A. – Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, 21 de setembro de 2020

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

Adriano Roberto Bergmann

Graduou-se em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2003. Iniciou suas atividades na Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) em 2010 e atualmente exerce suas funções na área de planejamento da logística de petróleo.

Ficha Catalográfica

Bergmann, Adriano Roberto

Roteamento de navios no processo de alívio de plataformas de petróleo para exportação / Adriano Roberto Bergmann ; orientador: Rafael Martinelli Pinto. – 2020.

67 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2020.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Roteamento de navios. 3. Petróleo. 4. Coleta e entrega. 5. Janelas de tempo. I. Pinto, Rafael Martinelli. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Dedico ao meu pai Celso (*in memoriam*), que tanto se orgulhava de nossas conquistas – apenas três meses nos separaram de uma comemoração presencial desta defesa – e às quatro mulheres da minha vida: minha mãe Elisia, minha esposa Cristiane, e minhas filhas Yasmim e Valentina.

Agradecimentos

Agradeço a todos que direta ou indiretamente ajudaram no desenvolvimento desta pesquisa, e em especial:

À Petrobras, por permitir e estimular que seus funcionários se qualifiquem e se desenvolvam profissionalmente. Sem seu apoio, este mestrado não teria virado realidade.

Aos professores da PUC-Rio pela recepção e contribuição científica.

Ao André e ao Daniel Sales, pela oportunidade.

Ao Marcelo Maia, pelo incentivo, confiança e impulso necessário.

À Silvia e ao Pércio por me ajudarem na definição da temática da dissertação e aos colegas da Alocação pelo apoio constante.

Aos gestores Steffanello, Rodrigo, Luciana e Siqueira pelo direcionamento, compreensão e apoio necessário para concluir esta etapa. Não foi fácil finalizar um artigo e uma dissertação em plena quarentena, trabalhando em *home office* e cuidando de duas (lindas) crianças em ambiente domiciliar.

Ao amigo Sérgio pela cuidadosa revisão realizada.

Ao Professor e Orientador Rafael Martinelli, por toda a dedicação e pelo pronto atendimento sempre que necessário.

Aos integrantes da banca, que proporcionaram valiosas dicas.

Aos meus familiares, que estão vibrando com mais esta conquista.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Bergmann, Adriano Roberto; Martinelli Pinto, Rafael (Orientador). **Roteamento de Navios no Processo de Alívio de Plataformas de Petróleos para Exportação**. Rio de Janeiro, 2020. 67 p. Dissertação de Mestrado (opção profissional) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta uma aplicação prática do roteamento de navios com coleta-e-entrega e janelas de tempo para o alívio de plataformas de petróleo para exportação. Especificamente para este caso, os navios aliviadores fazem o transporte do petróleo de plataformas *offshore* diretamente para um terminal de transbordo, onde a carga será transferida para outro navio para ser exportado. Foram propostas adaptações a um modelo de programação linear inteira mista já existente, buscando descrever as peculiaridades deste processo e facilitar a sua resolução pelo método exato. O modelo foi testado com dados realísticos de uma empresa petrolífera e pode fornecer soluções de alta qualidade para testes com períodos de até 30 dias em um tempo de processamento computacional inferior a 10 minutos, estando assim adequado ao uso na rotina do programador de navios desta empresa.

Palavras-chave

Roteamento de navios, coleta-e-entrega, janelas de tempo.

Abstract

Bergmann, Adriano Roberto Bergmann; Martinelli Pinto, Rafael (Advisor). **Ship Routing in the Oil Platform Offloading Process for Exportation**. Rio de Janeiro, 2020. 67 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study presents a practical application of ship routing with pickup-and-delivery and time windows for offloading operations in offshore oil platforms. Specifically in this case, the shuttle tankers transport crude oil from the offshore platforms directly to an onshore terminal, where the cargo will be transferred to another vessel to be exported. Adaptations to an existing mixed-integer linear programming model are proposed to better represent this process and facilitate its resolution by the exact method. The model was tested with realistic data from an oil and gas company and it can provide high-quality solutions for tests with periods up to 30 days, in a processing time of less than 10 minutes, thus being suitable for use in the routine of the company's ship programmer.

Keywords

Ship routing, pickup-and-delivery, time windows.

Sumário

1	Introdução	13
1.1.	Motivação	15
1.2.	Objetivos e delimitação da pesquisa	17
1.3.	Estrutura do trabalho	17
2	Descrição do Problema	19
2.1.	O petróleo e suas características	19
2.2.	A exploração de petróleo no Brasil	20
2.3.	A importância do roteamento de navios no contexto regulatório	21
2.4.	Descrição do processo de produção de petróleo	22
2.5.	Descrição do processo de destinação do petróleo	23
2.6.	Descrição do processo de alívio de petróleos para exportação	25
2.7.	Premissas e regras operacionais utilizadas na modelagem	29
3	Revisão da Literatura	31
3.1.	Problema clássico de roteamento de veículos	31
3.2.	Roteamento de veículos com coleta-e-entrega e janelas de tempo	33
3.3.	Roteamento de veículos aplicado ao modal marítimo	37
3.4.	Roteamento de navios no alívio de plataformas de petróleo	39
4	Modelagem Matemática	40
4.1.	Estruturação do problema	40
4.2.	Variáveis, conjuntos e parâmetros	41
4.3.	Modelagem do problema	42
4.4.	Fixação de variáveis	47
5	Resultados obtidos	50
5.1.	Aplicação do modelo	50
5.2.	Base de dados reduzida para testes	50
5.2.1.	Primeira solução factível encontrada para os testes	52

5.2.2. Melhor solução encontrada para os testes	54
5.2.3. Conclusões dos testes iniciais	56
5.3. Dados realísticos de programação	56
6 Conclusão	60
6.1. Trabalhos futuros	61
7 Referências bibliográficas	62

Lista de figuras

Figura 1 – Previsão anual da produção de petróleo no Brasil	15
Figura 2 – Localização do polígono do pré-sal	21
Figura 3 – Ilustração do funcionamento de uma FPSO	23
Figura 4 – Ilustração esquemática do roteiro de um navio aliviador	26
Figura 5 – Imagem de uma operação de transbordo no Porto de Açu	27
Figura 6 – Imagem de uma operação de transbordo no TEBIG – Angra dos Reis – RJ.	28
Figura 7 – Ilustração do processo clássico de roteamento de veículos	32
Figura 8 – Operações do Navio2 na primeira solução factível encontrada	53
Figura 9 – Operações do Navio3 na primeira solução factível encontrada	53
Figura 10 – Operações do Navio4 na primeira solução factível encontrada	54
Figura 11 – Operações do Navio2 na melhor solução encontrada	55
Figura 12 – Operações do Navio3 na melhor solução encontrada	56

Lista de tabelas

Tabela 1: Variáveis de decisão.	41
Tabela 2: Conjuntos e parâmetros.	41
Tabela 3: Dados dos navios utilizados para o teste.	51
Tabela 4: Dados dos alívios utilizados para o teste.	51
Tabela 5: Dados das posições iniciais utilizadas para o teste.	52
Tabela 6: Dados utilizados nos experimentos computacionais.	57
Tabela 7: Resultados dos experimentos computacionais (FO, GAP e tempo).	57
Tabela 8: Resultados dos experimentos computacionais (navios utilizados).	58
Tabela 9: Impacto no tempo de processamento com e sem as Restrições (4.21), (4.22) e (4.23).	59

Lista de siglas e abreviaturas

ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CVRP	<i>Capacited vehicle routing problem</i>
DARP	<i>Dial-a-ride problem</i>
DP2	Posicionamento dinâmico classe 2
FPSO	Unidades flutuante de produção, armazenamento e descarregamento de petróleo
FSO	Unidades flutuante de armazenamento e descarregamento de petróleo
MIRP	<i>Maritime inventory routing problem</i>
PDPTW	<i>Pickup and delivery problem with time windows</i>
PPSA	Pré-Sal Petróleo S.A.
TCP	<i>Time charter party</i>
TSP	<i>Traveling salesman problem</i>
VCP	<i>Voyage charter party</i>
VLSFO	<i>Very low sulphur fuel oil</i>
VRP	<i>Vehicle routing problem</i>
VRPTW	<i>Vehicle routing problem with time windows</i>
VRPPD	<i>Vehicle routing problem with pickup and delivery</i>
VRPPDTW	<i>Vehicle routing problem with pickup and delivery with time windows</i>

1 Introdução

O modal marítimo é o principal meio de transporte do petróleo produzido no Brasil. Dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários mostram que em 2019, foram movimentados 240,3 milhões de toneladas de produtos na cabotagem, sendo que deste total, 41% foi o transporte de petróleo das plataformas de produção *offshore* para os terminais aquaviários brasileiros (ANTAQ, 2019). Esta operação é conhecida na indústria petrolífera como “alívio de plataforma” (ou *offloading*, ou *lifting*, ou simplesmente alívio) e engloba o carregamento do petróleo armazenado em unidades de produção em alto-mar, o transporte e o descarregamento em terminais. Nestes terminais, o petróleo será estocado para posterior envio para refinarias ou será transbordado diretamente para navios de longo curso, para fins de exportação. Dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis mostram que em 2019 foram produzidos 1.018 milhões de barris de petróleo no Brasil, sendo que 96% desta produção foi em alto-mar (ANP, 2020a), evidenciando assim, que a quase totalidade do óleo produzido no Brasil depende de navios aliviadores para seu escoamento. Desta forma, a otimização das operações do transporte marítimo de petróleo entre plataforma e terminal agrega muito valor ao negócio de exploração e produção. É importante ressaltar que o alívio de plataforma também poderá ocorrer diretamente nos navios que fazem trajetos intercontinentais, porém são situações pouco frequentes e não fazem parte do escopo deste estudo.

A cadeia de suprimentos na indústria de petróleo contém vários desafios. Muitos destes desafios estão na área de logística e são exclusivos deste setor. Como exemplo, lidar com longos *lead-times*, grandes capacidades produtivas, transportes de grandes distâncias, meios de transporte lentos e ainda a necessidade de manter altos níveis de serviço e eficiência. Mesmo assim, sempre existirão oportunidades para a redução de custos desta logística (Hussain *et al.*, 2006).

Christiansen *et al.* (2004) ressaltam a importância de otimizar as operações marítimas, pois um navio envolve um grande investimento de capital (milhões de

dólares) e os custos operacionais diários são da ordem de dezenas de milhares de dólares. Assim, otimizar a utilização da frota impacta em significativo retorno financeiro, bem como redução de impacto ao meio ambiente. Fagerholt (2004) compartilha da mesma opinião e complementa que a significativa economia gerada pode ser crucial para a sobrevivência de uma empresa num setor tão competitivo.

Este trabalho apresenta uma aplicação prática do roteamento de navios no processo de coleta-e-entrega com janelas de tempo para o alívio de plataformas de petróleo. Conforme Ropke *et al.* (2007), no problema de coleta-e-entrega com janelas de tempo (*Pickup and Delivery Problem with Time Windows – PDPTW*), os veículos devem ser roteados para satisfazer um conjunto de demandas de transporte entre origens e destinos. Além das restrições de capacidade e janelas de tempo, os veículos devem satisfazer restrições de pareamento (cada coleta está associada a uma entrega) e precedência (a entrega ocorre após a coleta). Rotear navios significa encontrar rotas factíveis e otimizadas para cada navio. Por rota, entende-se todas as operações que o navio fará ao longo do tempo, desde sua saída do ponto inicial, suas operações de alívio e a chegada no ponto final. Especificamente para este caso em estudo, os navios aliviadores fazem o transporte do petróleo das plataformas *offshore* diretamente para um terminal de transbordo, onde a carga será transferida para outro navio para ser exportado.

Embora a exportação seja apenas um processo dentro da cadeia logística do petróleo, sua importância se dá pelo volume transportado. Dados atualizados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis mostram que o Brasil exportou 42% da sua produção em 2019 (ANP, 2020b). São aproximadamente 428 milhões de barris petróleo exportados, o equivalente a aproximadamente 428 lotes de exportação, considerando que cada lote é usualmente comercializado com um volume médio de 1 milhão de barris. Para fins comparativos, este volume exportado corresponde ao consumo de petróleo da Itália em 2019 (EIA, 2020) ou aproximadamente 40% do consumo do Brasil em 2018 (ANP, 2019).

Assim, foram propostas adaptações ao modelo de programação linear inteira mista desenvolvido por Rodrigues *et al.* (2016), para que o mesmo possa ser utilizado no roteamento de navios no alívio de plataformas de petróleos para exportação. Inicialmente, foram propostas restrições para o mesmo navio aliviar o mesmo lote quando formado por dois alívios distintos. Também foram propostos

novos cortes e eliminadas restrições relacionadas a calado, tamanho do navio e posicionamento dinâmico, buscando diminuir o tempo de processamento e facilitar a convergência do algoritmo pelo método exato. O modelo foi testado com dados realísticos de uma empresa petrolífera brasileira.

Por fim, o modelo proposto está adequado para ser utilizado na rotina operacional dos programadores de navios aliviadores, podendo ser utilizado como uma ferramenta de apoio para rapidamente encontrar uma roteirização factível para a frota disponível, tendo como entrada os dados dos alívios, o posicionamento inicial e os dados operacionais dos navios. Em menos de 10 minutos, o modelo poderá encontrar uma solução otimizada, gerando uma economia direta do consumo de *bunker*¹ dos navios. Importante salientar que encontrar a primeira roteirização factível é um resultado relevante, pois é suficiente para economizar milhares de dólares, evitando-se previamente o deslocamento desnecessário de navios.

1.1. Motivação

As previsões de produção de petróleo para os próximos anos apontam para uma produção total crescente, puxada pela produção em alto-mar, enquanto que a produção em terra fica praticamente estável, conforme pode ser visualizado na Figura 1.

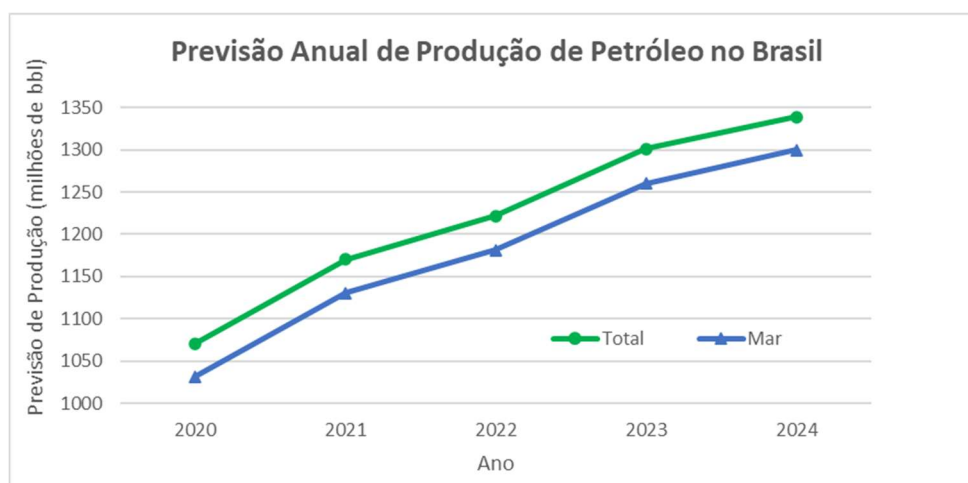


Figura 1 – Previsão anual da produção de petróleo no Brasil

Fonte: dados da ANP (2019a)

¹ *Bunker* é o combustível utilizado em embarcações de grande porte.

Esta perspectiva de crescente aumento da produção de petróleo no Brasil, especialmente em alto-mar, explica a necessidade de constante otimização das operações das frotas de navios aliviadores, que tendem a aumentar seu número de embarcações. Além do aspecto econômico da redução de custos, que é primordial para as empresas exploradoras e de transporte, ainda há um aspecto ambiental relevante, pois algoritmos roteadores podem ser programados para utilizar primeiramente os navios energeticamente mais eficientes (menor consumo de *bunker* por milha navegada), bem como navegar distâncias otimizadas (menores). São pequenas ações, que somadas, vão de encontro aos atuais anseios de nossa sociedade, que exige ações de sustentabilidade das empresas.

Energias alternativas e renováveis aos poucos ganham espaço, diminuem seus custos e começam a ter competitividade no mercado de energia e este é mais um motivo para empresas de exploração e produção de petróleo reduzirem seus custos logísticos e se prepararem para esta competição.

Como exemplo da importância da redução de custos, maior eficiência e cuidados com o meio ambiente, seguem os cinco pilares do Plano Estratégico 2020-2024 da maior petroleira brasileira (Petrobras, 2020):

- Maximização do retorno sobre capital empregado.
- Redução do custo de capital.
- Busca incessante por custos baixos e eficiência.
- Meritocracia.
- Segurança, respeito às pessoas e ao meio ambiente.

Na empresa estudada, a programação dos navios aliviadores é feita de forma integrada com o planejamento corporativo mensal. A partir de então, eventuais mudanças nesta programação passam a ser executadas por programadores altamente experientes, com base na sua vivência na rotina operacional. O modelo aqui estudado pode ser agregado como uma ferramenta simples e ágil de apoio, para adaptar programações prejudicadas (por exemplo, por eventos de mau-tempo, que impedem alívios nas janelas programadas) e também para a visualização de cenários futuros (alterando as datas ou locais dos alívios, por exemplo). Neste negócio, é importante ter respostas rápidas e embasadas por modelos matemáticos de roteamento de navios para responder a situações que ocorrerão daqui a 20 ou 30

dias. Perguntas do tipo: “haverá navio para a janela proposta daqui a 30 dias?”, ou “qual navio deverá fazer o alívio da carga que foi postergada em 3 dias?”, ou “é interessante trocar a ordem de alívio com o parceiro que não poderá cumprir sua programação?”.

Em suma, para qualquer empresa petrolífera, é um importante diferencial competitivo ter modelos que possam nortear rapidamente as decisões tomadas no dia-a-dia da rotina operacional dos programadores de navios e também nortear decisões futuras, com impactos relevantes. Estes programadores tomam decisões importantes e custosas, pois sempre estarão lidando com grandes volumes de petróleo e os contratos com clientes têm pouca margem para erros. As multas contratuais pelo não cumprimento de algum item são elevadas, como por exemplo, o não cumprimento da faixa de descarregamento ou de algum volume acordado. Decisões mais assertivas destes programadores também conferem mais previsibilidade e conseqüentemente mais qualidade de vida para a tripulação que opera os navios, pois evita reprogramações de última hora ou desembarque em um porto não programado.

1.2. Objetivos e delimitação da pesquisa

O objetivo desse trabalho é desenvolver uma modelagem que possa ser utilizada pela equipe de programação de navios aliviadores e permitir o roteamento ótimo dos navios, baseado no menor consumo de *bunker* e conseqüentemente no menor custo operacional e menor impacto ambiental.

A partir desta modelagem também será possível analisar melhores janelas de tempo e/ou simular e analisar condições adversas das habituais, como por exemplo, alterando a velocidade ou o consumo de *bunker* dos navios. Será possível também levantar restrições de frota ou eventuais ociosidades.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2, é apresentado o problema que será estudado, partindo-se de informações básicas sobre exploração e comercialização de petróleos e posteriormente é contextualizado o roteamento de

navios e sua importância crescente dentro do atual marco regulatório para exploração e produção de petróleo no Brasil. Também há uma descrição do processo de alívios de plataformas de petróleo e a formação de lotes para exportação. No Capítulo 3, é apresentada uma breve revisão da literatura sobre os problemas clássicos de roteamento de veículos para o modal rodoviário e são introduzidos os problemas relativos ao modal marítimo. No Capítulo 4, é apresentada a formulação matemática do problema de coleta-e-entrega e janelas de tempo aplicado ao processo de exportação de petróleo. No Capítulo 5, são apresentados os resultados computacionais, partindo-se de um cenário para testar o modelo implementando e posteriormente cenários que representam quatro meses de programação real da empresa estudada. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

2 Descrição do Problema

Este capítulo apresenta os termos gerais do problema de roteamento de navios aplicado ao processo de alívio de plataformas de petróleo para exportação. Para tanto, será detalhado todo o processo da cadeia produtiva do petróleo, desde sua origem até sua destinação. Posteriormente, será contextualizado o roteamento de navios e sua importância crescente dentro do atual marco regulatório para exploração e produção de petróleo no Brasil. Este capítulo finaliza com uma descrição do processo de alívio de plataformas de petróleo e a formação de lotes para exportação.

2.1. O petróleo e suas características

O petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos líquidos em estado natural e tem alto interesse comercial. Conforme Farah (2006):

O petróleo não é uma substância homogênea e suas características variam grandemente de acordo com o campo produtor. Isto se deve à grande variedade de hidrocarbonetos e não-hidrocarbonetos que podem ocorrer em sua composição e que apresentam propriedades físicas bastante distintas entre si. Assim, as propriedades físicas dos petróleos podem variar, principalmente de acordo com o tipo predominante de hidrocarbonetos presentes. A diversidade de tipos e características de hidrocarbonetos que ocorrem no petróleo vai se refletir nos derivados obtidos pela sua separação por processos físicos. Esta diversidade será ainda aumentada pelos processos químicos de transformação existentes nas refinarias.

Esta definição esclarece que o petróleo não é um produto único e nem todos os petróleos são iguais. Comercialmente, os petróleos são valorados pelos rendimentos de cada fração em diferentes faixas de ebulição, bem como através de parâmetros físicos e químicos medidos nestas frações.

De forma simplificada, podemos dizer que cada petróleo (aqui algumas vezes chamado apenas de “óleo”) tem uma qualidade média e assim ele é apresentado ao mercado. Cada campo de produção ou cada plataforma produz um petróleo com

qualidade própria característica, e quando um cliente compra um determinado óleo, ele espera que essa qualidade se reflita na produção de derivados de sua refinaria. Em outras palavras, podemos dizer que se houver a venda de um determinado óleo, este óleo deve ser entregue, não havendo intercambialidade deste com óleos provenientes de outros campos (a menos que haja prévia negociação com o cliente).

2.2. A exploração de petróleo no Brasil

O petróleo é usualmente encontrado em rochas reservatórios localizadas em depressões da crosta terrestre, denominadas de bacias sedimentares. O Brasil possui 29 bacias sedimentares com potencial de ocorrência de petróleo, espalhadas em uma área de 7,175 milhões de km² (ANP, 2010c).

O monopólio estatal do petróleo no Brasil iniciou em 1953 (Lei Federal nº 2004, de 03/10/1953) e perdurou até 1997 (Lei Federal nº 9.478, de 06/08/1997). Com o fim deste monopólio, que era exclusividade da Petrobras, as empresas privadas constituídas no Brasil tiveram a oportunidade de investir em exploração de petróleo, através de rodadas de licitação de blocos exploratórios.

Em 22/12/2010, através da Lei Federal nº 12.351, foi instituído o regime regulador para a exploração e produção de petróleo e gás natural, com o objetivo de regular áreas de interesse estratégico para o Brasil, sendo uma delas a área conhecida como “*polígono do pré-sal*” (Figura 2), origem da maior parte do petróleo atualmente produzido. Para representar o Governo Federal nos consórcios de exploração e produção no pré-sal, foi criada a estatal brasileira Pré-Sal Petróleo S.A. – PPSA (ANP, 2010c). É importante ressaltar a distância da costa e a profundidade no oceano desta região produtora, o que faz com que o escoamento do petróleo ocorra através de navios aliviadores, não existindo oleodutos para esta finalidade.

Os vencedores das rodadas licitatórias para muitos campos foram consórcios formados por diversas empresas petrolíferas, incluindo a própria Petrobras. Atualmente a PPSA faz a gestão de 17 contratos de partilha da produção (PPSA, 2019).



Figura 2 – Localização do polígono do pré-sal

Fonte: ANP (2020c)

2.3.

A importância do roteamento de navios no contexto regulatório

Em função dos marcos regulatórios brasileiros possibilitarem a formação de consórcios e parcerias para a exploração e produção de petróleo, naturalmente ocorreu um movimento de alianças entre grandes empresas petrolíferas, no sentido de compartilharem *know-how*, dividirem gastos e também compartilharem riscos, uma vez que o setor demanda elevados investimentos.

Com o sucesso da fase exploratória, a finalização da construção dos poços, a instalação e o comissionamento das unidades, inicia-se a produção. A exploração consorciada de um campo com uma ou mais plataformas, exige uma organização prévia de eventos, tais como as janelas de alívios, de forma que antecipadamente todos os integrantes possam planejar suas operações. Assim, são celebrados acordos que regem as operações de plataforma (*lifting agreements*) e que estabelecem regras e/ou punições caso um membro não retire o óleo que lhes pertence na janela estabelecida. Quando um integrante falha em retirar sua parcela de produção, coloca

em risco a continuidade das operações, pois as plataformas possuem capacidade de armazenamento limitada e os poços não são projetados para serem constantemente fechados.

A necessidade de se ter uma programação prévia dos alívios é suprida pelos cronogramas de alívios (*lifting schedules*), feito de forma acordada entre todos os integrantes. Nessa programação são definidos os volumes a serem aliviados, a janela de tempo e quem será o responsável por este alívio (proprietário da carga). Caso seja de interesse de uma das partes, ela poderá propor alterações nas datas. Para que cada integrante do consórcio tenha tempo suficiente para programar suas operações e seus navios aliviadores, a programação dos alívios é definida com bastante antecedência.

Neste contexto de crescente formação de parcerias, perde espaço a gestão integrada de frota e de inventário exclusivamente através de modelos de MIRP - *Maritime Inventory Routing Problem*, que pode ser descrito num processo onde apenas um ator é responsável por controlar o inventário de petróleo (na plataforma e/ou no terminal de descarga), bem como as rotas e as programações dos navios aliviadores (Christiansen *et al.* 2013). Para o caso em estudo, onde as datas dos alívios são pré-determinadas com antecedência, a roteirização de navios com janelas de tempo toma importância, no sentido de prover e otimizar a frota necessária, bem como evitar penalizações por não conseguir honrar o acordado.

Assim, este trabalho busca otimizar as operações de navios aliviadores de uma grande empresa petrolífera que participa ativamente em vários consórcios de campos produtores e desta forma necessita aliviar o petróleo que lhe pertence, conforme programação previamente acordada.

2.4.

Descrição do processo de produção de petróleo

O petróleo é produzido e estocado primeiramente em embarcações denominadas FPSOs (unidades flutuantes de produção, armazenamento e descarregamento de petróleo). Estas embarcações são navios adaptados e preparados para fazer a extração, o processamento primário, o armazenamento e a posterior transferência do petróleo para navios aliviadores. A extração é feita através de dutos flexíveis conectados diretamente aos poços produtores e por este

motivo, as FPSOs ficam permanentemente ancoradas em alto-mar. O bombeamento do óleo para o navio aliviador ocorre sob demanda, através da interligação de um mangote flexível. Uma ilustração do funcionamento de uma FPSO pode ser visualizada na Figura 3 (Petrobras, 2017), mostrando inclusive (no lado direito) sua conexão com um navio aliviador.

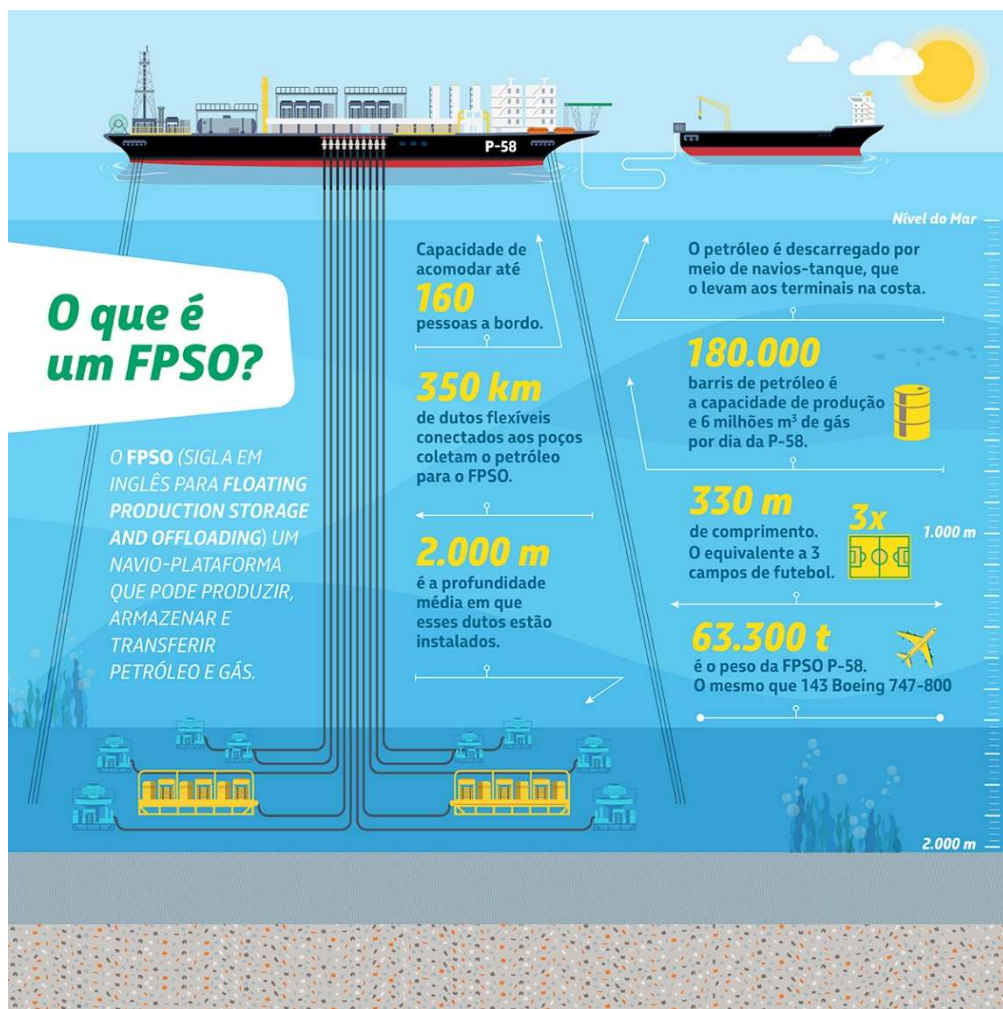


Figura 3 – Ilustração do funcionamento de uma FPSO

Fonte: Petrobras, 2017

2.5.

Descrição do processo de destinação do petróleo

Na empresa estudada, ocorre mensalmente um planejamento integrado visando otimizar o processo produtivo e a tomada de decisão. Neste momento é definido o destino do petróleo produzido. Parte dele será encaminhado para terminais para posterior envio para refinarias e parte será destinada para a

exportação, foco deste estudo. Assim, previamente já são definidos quais os petróleos e respectivos volumes serão disponibilizados para exportação (ou simplesmente aqui denominado como “venda”).

A partir destas informações e considerando a programação de alívios já conhecida das plataformas em parceria, são formados os lotes de exportação. Cada lote é nomeado através de um *tag* e tem definido o nome do petróleo (qualidade já conhecida no mercado), volume a ser aliviado em cada origem (quais plataformas serão aliviadas), destino (terminal onde será feito o transbordo para o navio exportador) e suas respectivas janelas de tempo. Após este processo, os lotes são ofertados ao mercado, com uma antecedência mínima de 30 dias em relação a data de partida do navio que fará o transporte até o cliente final.

Usualmente cada lote é formado por uma única qualidade (característica) de petróleo, o qual poderá vir de uma única plataforma ou de diferentes plataformas. Busca-se sempre aliviar o volume exato de uma venda de uma única plataforma. Muitas vezes isso não é possível e o mesmo navio aliviador deverá compor sua carga com dois alívios de duas plataformas diferentes ou aguardar a produção de uma mesma plataforma para uma segunda retirada. Essa divisão de lotes pode ocorrer por diversos motivos, sendo os mais recorrentes a baixa capacidade de armazenamento ou a baixa taxa de produção de algumas plataformas. Em outros casos, pode haver um alívio nomeado para a empresa e o alívio seguinte ser de responsabilidade de outro consorciado, ocasião em que será necessário desamarar o aliviador próprio para que o navio do parceiro possa amarrar e carregar. Sempre que possível, para o mesmo lote, busca-se fazer alívios com janelas de tempo consecutivas ou muito próximas, para otimizar o giro do navio. Se as janelas entre um alívio e outro do mesmo lote de exportação forem maiores que 2 ou 3 dias, deve-se decidir entre fazer o mesmo aliviador aguardar as duas retiradas ou utilizar dois aliviadores diferentes para este fim.

Num terminal de transbordo para exportação, o navio que fará a entrega para o cliente tem uma data prevista para sair, um volume pré-definido e um determinado tipo de petróleo previsto para carregar. Não há flexibilidade para mudanças de óleo ou de janelas de alívio.

Os terminais que atendem refinarias operam de forma diferente, pois dispõem de tanques próprios para armazenamento de petróleo, bem como as refinarias também dispõem de seus próprios tanques. Com isso, cria-se um pulmão que

flexibiliza a data de chegada de petróleo no terminal, bem como flexibiliza qual o tipo (qualidade) de petróleo que pode chegar. Em alguns momentos, a refinaria pode consumir um petróleo totalmente diferente daquele previsto em seu planejamento. Neste contexto, os navios que atendem os terminais são flexíveis em termos de capacidades e em termos de janela de alívio.

2.6.

Descrição do processo de alívio de petróleos para exportação

O foco deste estudo é o alívio de plataformas através de navios tipo *Suezmax*, com capacidade de transporte unitário da ordem de 1 milhão de barris e com posicionamento dinâmico classe 2 (DP2). A capacidade do navio foi projetada para atender o volume usual de um lote de comercialização de petróleo e por este motivo é utilizado nos alívios de óleos já compromissados com exportação. O posicionamento dinâmico classe 2 é pré-requisito para atendimento de um grupo restrito de plataformas. São navios altamente modernos em termos de segurança operacional, pois têm um sistema computadorizado redundante que controla propulsores que os garantem manter em uma posição estacionária em determinado ponto próximo a plataformas do tipo FPSOs e FSOs (unidades flutuantes de armazenamento e descarregamento), inclusive em condições de mar adversas. São navios especializados em alívios de plataformas e não são utilizados para viagens intercontinentais de exportação de petróleo. As exportações demandam navios do tipo convencionais com capacidades usuais de um ou dois milhões de barris. Por serem convencionais, têm aluguéis, fretes e demais custos menores que navios tipo DP2.

No terminal de transbordo, haverá a descarga do navio aliviador diretamente para o navio exportador, que fará a entrega ao cliente final. Caso um lote necessite de dois alívios, é sempre desejável fazer ambos os alívios utilizando o mesmo navio aliviador. Se o lote estiver fracionado em dois aliviadores, o navio exportador terá um tempo de espera maior, conseqüentemente maiores custos de aluguel e custos operacionais. Aguardará adicionalmente pela manobra de saída do primeiro aliviador e a manobra de entrada do segundo aliviador no terminal. Por manobra, entende-se o deslocamento do navio entre a área de fundeio e sua posição adequada no terminal ou vice-versa, bem como o engate correto dos mangotes de

transferência. Cada manobra dura algumas horas e dependerá da maré, condições meteorológicas, luz do dia em alguns locais, entre outros fatores, além de demandar custos operacionais e portuários e maior exposição a riscos de segurança e meio-ambiente. Assim, dividir o mesmo lote em dois aliviadores diferentes é indesejável, porém, em alguns momentos e por motivos diversos, pode ser necessário (quando não há disponibilidade de outro navio, por exemplo).

Para ilustrar o processo de alívio de plataformas de petróleo para exportação, é apresentado um roteiro hipotético de um navio aliviador na Figura 4. O navio aliviador sai do Terminal A, navega até a plataforma P1 e carrega parte de um lote. Após, navega até a plataforma P2 e alivia o restante deste lote. Então, retorna até o Terminal A para transbordar para o navio exportador (de longo curso). Após, o navio se desloca para a plataforma P3 e alivia um lote inteiro, o qual será transbordado no Terminal B. Em seguida faz novo alívio de um lote inteiro na plataforma P4 e retorna para transbordar no Terminal B. Após, carrega um lote formado por dois alívios consecutivos nas plataformas P6 e P5 e transborda no Terminal B. Finaliza seu roteiro carregando um lote de alívio único na plataforma P7 e transbordando no Terminal C.



Figura 4 – Ilustração esquemática do roteiro de um navio aliviador

Fonte: O autor.

Navios do tipo *Aframax*, com capacidade de transporte unitário da ordem de 700 mil barris, somente serão utilizados em último caso, quando toda a frota

Suezmax estiver em uso. São evitados, pois não conseguem carregar um lote inteiro de exportação (1 milhão de barris), necessitando a combinação de outro alívio para completar o lote. Não raramente navegam com praça morta (espaço vazio no navio) com somente meio lote (500 mil barris) para compor uma carga. Uma imagem de um transbordo ocorrendo no Porto de Açu, em São João da Barra – RJ, pode ser visualizada na Figura 5.



Figura 5 – Imagem de uma operação de transbordo no Porto de Açu

Fonte: G1 Norte Fluminense, 2019 (imagem de divulgação da Prumo Logística).

Importante aqui diferenciar as formas de contratação das embarcações. Os navios utilizados nos alívios de plataforma são normalmente contratados na modalidade TCP (*time charter party*), enquanto que os navios exportadores podem ser contratados tanto na modalidade TCP, como VCP (*voyage charter party*).

Conforme Rocha (2012), contratos TCP são contratos de aluguel por tempo. Nesta modalidade, o armador fica responsável pela gestão náutica (seguros, mantimentos, tripulação, etc.), enquanto o afretador fica responsável pela utilização da embarcação e pela gestão comercial (despesas com *bunker* e/ou outros combustíveis, despesas portuárias, etc.). Na modalidade VCP, o navio é contratado para uma única viagem, com origem, destino, carga e data previamente definidos. Tanto a gestão náutica, quanto a gestão comercial do navio ficam por conta do fretador, que fica responsável por custos de combustível, seguros, tripulação, mantimentos, despesas portuárias, etc.

Assim, podemos considerar que os custos mensais de afretamento dos navios aliviadores são praticamente fixos, pois são normalmente contratados na modalidade TCP, sendo o consumo de *bunker* um dos custos variáveis mais expressivos e que necessariamente deve ser otimizado.

Na Figura 6, pode-se visualizar duas operações de transbordo simultâneas (dois navios aliviadores transbordando para dois navios exportadores) no Terminal de Angra dos Reis – RJ (TEBIG).

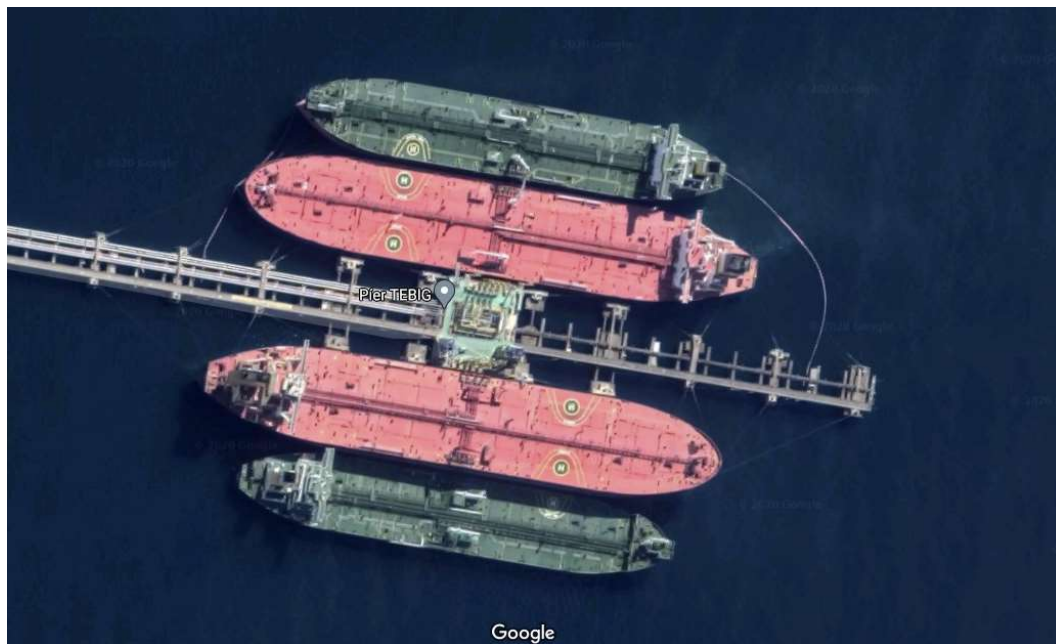


Figura 6 – Imagem de uma operação de transbordo no TEBIG – Angra dos Reis – RJ.

Fonte: Google Maps, 2020.

2.7.

Premissas e regras operacionais utilizadas na modelagem

Para tornar o modelo mais simples e disponibilizar uma ferramenta ágil e de fácil inserção de dados de entradas, foram adotadas algumas premissas e regras operacionais:

- Não há restrições entre navios aliviadores e as plataformas elencadas para alívio. Qualquer navio pode amarrar vazio ou com meia carga (ou em qualquer proporção) em qualquer plataforma e começar a operação imediatamente.
- Não há restrições entre navios aliviadores e os navios de transbordo para exportação. Também não foram consideradas restrições sobre uma eventual formação de fila no terminal de destino dos alívios. Considera-se que o aliviador descarregará assim que chegar no terminal e imediatamente estará disponível para a próxima operação.
- Cada navio inicia sua rota em uma “posição inicial” e termina em uma “posição final”, sem carga em ambos os casos. A “posição inicial”, para cada navio, sempre será localizada num ponto conhecido (num terminal ou numa plataforma). Do ponto de vista prático, esta posição pode ser facilmente estimada independentemente da operação que o navio esteja realizando. Caso o navio esteja carregado, basta estimar o momento que ele estiver vazio no terminal e pronto pra próxima operação. Caso esteja descarregado e navegando, basta estimar quando ele saiu do terminal ou quando estará pronto para operar na plataforma o qual está previsto o próximo alívio. Neste caso, é possível que o modelo indique outro destino para o navio e caberá ao programador analisar criticamente esta opção. A “posição final” é artificial e não há gasto de combustível para seguir até ela, independentemente da posição anterior do navio. Para tanto, a matriz com as distâncias entre os vértices i e j ($dist_{ij}$) deve ter zeros nas colunas e linhas correspondentes.

- O tempo de serviço na plataforma é definido como o tempo necessário para o navio amarrar, conectar, bombear, desconectar e desamarrar. No terminal, o tempo de serviço é definido como o tempo necessário para o navio manobrar para entrar, conectar, bombear, desconectar e manobrar para sair. Assim, estes tempos variam em função do tamanho do alívio (tempo de bombeamento) e em função da localização do alívio (a vazão de bombeio pode variar de uma plataforma em relação a outra).
- A programação a ser cumprida já tem definido quais os volumes de cada alívio, a denominação do lote a qual o alívio pertence (*tag*) e de qual plataforma ocorrerá o alívio. Ou o lote de exportação é formado por um único alívio, ou é formado por dois alívios da mesma plataforma em momentos distintos ou de plataformas diferentes. Quando um lote é formado por dois alívios, recebe a mesma denominação (*tag*).

3

Revisão da Literatura

O objetivo deste capítulo é apresentar os aspectos teóricos do problema clássico de roteamento de veículos e suas variantes principais que serão utilizadas ao longo deste trabalho. Logo em seguida, serão abordadas as situações de roteamento aplicadas a navios e também aplicadas ao alívio de plataformas. Desta forma, torna mais fácil o entendimento da construção do modelo o qual este trabalho foi baseado e as adaptações propostas.

3.1.

Problema clássico de roteamento de veículos

A primeira publicação sobre roteamento de veículos foi o trabalho de Dantzig e Ramser (1959) e se denominava “*The Truck Dispatching Problem*”, cuja modelagem minimizava a distância percorrida por uma frota homogênea de caminhões para abastecer postos de combustíveis. Alguns anos mais tarde, tendo este trabalho como referência, Clarke e Wright (1964) propuseram uma generalização deste problema e uma heurística para sua solução. Mais tarde, este problema se tornaria conhecido como “*Vehicle Routing Problem - VRP*” (Problema de Roteamento de Veículos) e desde então é um dos tópicos mais estudados na Pesquisa Operacional (Braekers *et al.*, 2016).

Conforme Kumar e Panneerselvam (2012), o problema clássico de roteamento de veículos busca um conjunto de rotas otimizadas de menor custo, onde os veículos são todos idênticos entre si e percorrem uma sequência de clientes geograficamente dispersos, com saída e chegada em um depósito central único, conforme ilustração na Figura 7. Cada cliente será atendido por um único veículo $k \in K$ (uma única rota) e este veículo deve atender os requisitos (ou restrições) deste cliente. Assim, o VRP clássico é definido como um grafo $G = (N, A)$, onde $N = \{0, \dots, n\}$ é um conjunto de vértices e $A = \{(i, j): i, j \in N, i \neq j\}$ é o conjunto de arestas. O vértice 0 representa o depósito central, enquanto os demais vértices representam os clientes.

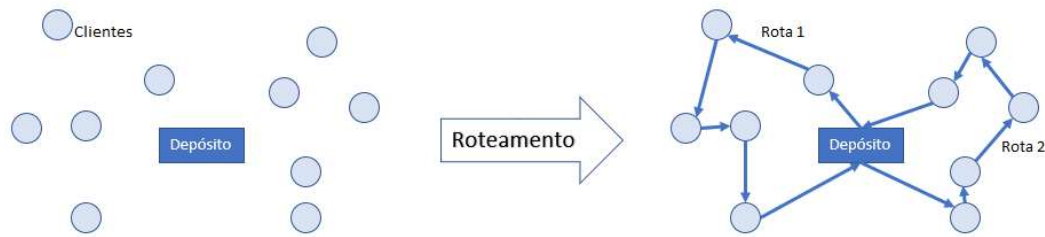


Figura 7 – Ilustração do processo clássico de roteamento de veículos

Fonte: o autor

Toth e Vigo (2002) descrevem o roteamento de veículos com restrições de capacidade (*Capacitated Vehicle Routing Problem - CVRP*) como a variante mais simples e mais estudada da família dos VRPs. Neste problema, os veículos têm uma capacidade de carga limitada e cada cliente i está associado a uma demanda d_i (demanda indivisível, não-negativa e previamente conhecida). Todos os veículos são idênticos, com uma capacidade individual máxima, e estão prontos para operar a partir do depósito central. Um custo não negativo c_{ij} é associado a cada aresta $(i, j) \in A$ e representa o custo da viagem para se deslocar do vértice i ao vértice j .

A viabilidade da solução é dada quando assumimos que as demandas individuais serão menores ou iguais que a capacidade máxima de cada veículo. Cada veículo pode ter no máximo uma rota e assumimos que a frota de veículos é sempre maior que o número de veículos necessários para atender todos os clientes. É necessário que todas as rotas passem pelo depósito e que cada cliente (vértice) seja visitado por somente um veículo. A soma das demandas dos clientes visitados não deve exceder a capacidade máxima do veículo que fará esta rota (Toth e Vigo, 2002).

De acordo com Andersson *et al.* (2010), a frota será homogênea se todos os veículos tiverem as mesmas características, tais como capacidade de transporte, custo fixo e/ou variável, autonomia ou velocidade. A frota será heterogênea se os veículos tiverem uma ou mais características diferentes entre si. Se a frota for heterogênea, poderá não ser viável a intercambialidade direta entre os veículos da frota, pois alguns veículos não terão capacidade de transporte suficiente para cumprir determinada rota, outros terão custos proibitivos, enquanto outros não conseguirão fazer a rota no tempo adequado.

3.2. Roteamento de veículos com coleta-e-entrega e janelas de tempo

Como forma de resolver e otimizar problemas práticos do dia-a-dia, a pesquisa em roteamento de veículos se desenvolveu através de modelos e métodos contendo características peculiares, tais como frota heterogênea, múltiplos depósitos, múltiplas rotas, janelas de tempo, coleta-e-entrega, entre outros. Braekers *et al.* (2016) classificaram as publicações envolvendo roteamento de veículos entre 2009 e meados de 2015 e mostraram que a literatura científica na atualidade é composta por uma gama bem ampla de variantes (características) e a maioria dos trabalhos são voltados para modelos realistas e soluções aplicadas. Como consequência, poucos trabalhos propõem abordagens gerais ou modelos capazes de resolver múltiplas variantes, sendo que muitas vezes as soluções são altamente adaptadas às particularidades destes problemas. Nos parágrafos seguintes será detalhada a roteirização de veículos contendo coleta-e-entrega com janelas de tempo, que é o objeto deste estudo. Para um aprofundamento sobre outras variantes, pode-se consultar os trabalhos de Irnich *et al.* (2014) e Braekers *et al.* (2016).

Conforme Baldacci *et al.* (2010), o roteamento de veículos com janelas de tempo (*Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW*) generaliza o CVRP, impondo que cada cliente deve ser visitado dentro de um intervalo de tempo determinado, chamado janela de tempo. Nesta variante, cada cliente $i \in N$ deve ser visitado dentro de sua janela de tempo individual $[e_i, l_i]$. O veículo sempre deve chegar antes de l_i e o serviço somente pode iniciar após a abertura da janela e_i . Caso o veículo chegue antes de e_i , o mesmo deverá aguardar a abertura da janela de tempo, sem penalidades. É assumido que todos os veículos deixem o depósito no tempo e_0 e retornem para ele antes do fechamento de sua janela l_0 . Adicionalmente, temos uma matriz dos tempos de viagem entre i e j (t_{ij}) e também um tempo de serviço associado ao vértice i (ts_i).

Cordeau *et al.* (2007), em seu trabalho intitulado “*Transport on Demand*”, foca nos aspectos de transporte, seja de passageiros ou mercadorias, entre origens e destinos previamente especificados. Como exemplo, temos o transporte de passageiros, serviços de atendimento de emergência, serviço de entrega de encomendas urbanas, compartilhamento de veículos, entre outros. Estes problemas de transporte são caracterizados pela presença de três objetivos conflitantes:

maximizar o número de demandas atendidas, minimizar os custos operacionais e minimizar a inconveniência ao usuário. Este último pode ser substituído por restrições de qualidade de serviço e é usualmente medido em função dos desvios dos tempos de coleta e/ou entrega especificados. Estes problemas são conhecidos na literatura como roteamento de veículos com coleta-e-entrega (*Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery – VRPPD*). O autor também explica que a grande maioria das aplicações reais de VRPPD incluem restrições de tempo nos locais que os veículos farão as visitas, logo é mais conveniente falar em roteamento de veículos com coleta-e-entrega e janelas de tempo (*Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery with Time Windows – VRPPDTW*). Aqui neste estudo, será denominado simplesmente de PDPTW.

O primeiro trabalho de roteirização de veículos contendo características de PDPTW foi de Wilson *et al.* (1971) e buscava otimizar o transporte de passageiros, uma variante conhecida por “*Dial-a-Ride Problem – DARP*”. O trabalho de Dumas *et al.* (1991) foi precursor ao tratar de múltiplos veículos no transporte de mercadorias, propondo um algoritmo exato e utilizando uma abordagem da decomposição de *Dantzig-Wolfe* para sua solução.

Conforme Cordeau *et al.* (2008), problemas de coleta-e-entrega do tipo "um-para-um" (*one-to-one*) ocorrem quando uma demanda se origina em um local e é destinada para outro. Em outras palavras, origem e destino já são previamente conhecidos antes da resolução do problema. Pelas características descritas, podemos dizer que este é o caso do roteamento de navios no processo de alívio de plataformas de petróleo para exportação.

O PDPTW é uma generalização do problema do Caixeiro-Viajante (*Traveling Salesman Problem – TSP*), logo é um problema do tipo NP-difícil. A presença de restrições temporais complica consideravelmente este problema e a sua solução é dificultada (Savelsbergh e Sol, 1995). Assim, algoritmos exatos são capazes de resolver apenas problemas de menores dimensões e isso explica, em parte, os resultados da pesquisa de Braekers *et al.* (2016), onde 71,3% das publicações utilizam métodos meta-heurísticos para sua solução e somente 17,1% das publicações são solucionados por métodos exatos. As meta-heurísticas mais utilizadas no roteamento de veículos podem ser consultadas no trabalho de Gendreau *et al.* (2008), enquanto que os métodos exatos podem ser consultados no trabalho de Baldacci *et al.* (2010).

A seguir é apresentada a formulação para o PDPTW dada por Cordeau *et al.* (2007), com a notação já ajustada para as particularidades desta variante. Seja um grafo $G = (N, A)$, onde $N = P \cup D \cup \{0, 2n+1\}$ representam os vértices. As coletas são descritas por $P = \{1, \dots, n\}$ e as entregas por $D = \{n+1, \dots, 2n\}$, sendo $A = \{(i, j): i, j \in N\}$ o conjunto de arestas. Os vértices 0 e $2n+1$ representam, respectivamente, o depósito de origem e o depósito de destino, para um número de demandas igual a n (cada demanda com origem em i está associada ao destino $n+i$). Cada veículo $k \in K$ tem uma capacidade Q_k e o tempo máximo de duração de sua rota não pode ultrapassar T_k . Cada vértice $i \in N$ está associado a uma demanda q_i , um tempo de serviço ts_i e uma janela de tempo $[e_i, l_i]$, enquanto que cada aresta (i, j) está associado a um tempo de trajeto t_{ij} . O instante que o veículo k inicia o serviço em i é dado por B_{ik} e Q_{ik} será a carga total do veículo k após visitar o nó i . O problema pode ser assim descrito:

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ijk} x_{ijk} \quad (3.1)$$

A função objetivo (3.1) minimiza a soma dos custos dos arcos utilizados na solução. A variável binária de decisão x_{ijk} assume 1, somente se o veículo k percorrer o arco (i, j) ; assume 0, caso contrário. c_{ijk} representa o custo do veículo k ao percorrer o arco (i, j) . As restrições deste problema são dadas por:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in P \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} - \sum_{j \in N} x_{n+1,jk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in P \\ \forall k \in K \end{array} \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{jik} - \sum_{j \in N} x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in (P \cup D) \\ \forall k \in K \end{array} \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,2n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.6)$$

$$B_{jk} \geq (B_{ik} + t_{ij} + ts_i) x_{ijk} \quad \begin{array}{l} \forall i \in N \\ \forall j \in N \\ \forall k \in K \end{array} \quad (3.7)$$

$$Q_{jk} \geq (Q_{ik} + q_j) x_{ijk} \quad \begin{array}{l} \forall i \in N \\ \forall j \in N \\ \forall k \in K \end{array} \quad (3.8)$$

$$B_{ik} + t_{i,n+i} + ts_i \leq B_{n+i,k} \quad \begin{array}{l} \forall i \in P \\ \forall k \in K \end{array} \quad (3.9)$$

$$B_{2n+1,k} - B_{0k} \leq T_k \quad \forall k \in K \quad (3.10)$$

$$e_i \leq B_{ik} \leq l_i \quad \begin{array}{l} \forall i \in N \\ \forall k \in K \end{array} \quad (3.11)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq Q_{ik} \leq \min\{Q_k, Q_k + q_i\} \quad \begin{array}{l} \forall i \in N \\ \forall k \in K \end{array} \quad (3.12)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \begin{array}{l} \forall i \in N \\ \forall j \in N \\ \forall k \in K \end{array} \quad (3.13)$$

As Restrições (3.2) garantem que cada coleta seja efetuada uma única vez, enquanto que (3.3) garantem que tanto a coleta, quanto a entrega, sejam efetuadas pelo mesmo veículo. Restrições (3.4) e (3.6) garantem que todos os veículos iniciem no depósito de origem 0 e terminem no depósito de destino $2n+1$. As Restrições (3.5) garantem a movimentação dos veículos. Quando um veículo percorre o arco (i, j) , as Restrições (3.7) somente permitem sua chegada em j , se o horário de saída de i somado com o tempo de deslocamento (t_{ij}) e o tempo de serviço (ts_i) na origem i são compatíveis com o horário de abertura da janela no destino j . As Restrições (3.8) garantem a consistência entre as cargas a serem ainda transportadas (q_i) e as cargas já carregadas no veículo k após visitar o nó i (Q_{ik}). As Restrições (3.9) forçam que a coleta ocorra antes da entrega e em (3.10) limita-se o tempo total (T_k) que pode durar a rota do veículo k . B_{ik} é uma variável real que determina o exato momento que se inicia o serviço em cada cliente ou no depósito, e é dada pelas expressões (3.11), enquanto (3.12) impõem as restrições individuais de capacidades dos veículos (Q_k). Importante salientar que não existem cargas nos depósitos ($q_0 =$

$q_{2n+1} = 0$) e que para cada carga coletada em i , há uma carga de mesmo tamanho ou volume que será entregue em $n+i$ ($q_i = -q_{n+i}$, onde $i = 1, \dots, n$).

O PDPTW é não-linear devido aos termos quadráticos (multiplicação de duas variáveis de decisão) nas Restrições (3.7) e (3.8) e são linearizados pelo método do *big-M*, onde M é uma constante suficientemente grande, conforme (3.14) e (3.15), respectivamente:

$$B_{ik} + t_{ij} + d_i - B_{jk} \leq M(1 - x_{ijk}) \quad \begin{array}{l} \forall i \in N \\ \forall j \in N \\ \forall k \in K \end{array} \quad (3.14)$$

$$Q_{ik} + q_i - Q_{jk} \leq M(1 - x_{ijk}) \quad \begin{array}{l} \forall i \in P \\ \forall k \in K \end{array} \quad (3.15)$$

3.3. Roteamento de veículos aplicado ao modal marítimo

Ronen (1983) fez a primeira pesquisa aplicada ao roteamento de navios e destaca o que difere os problemas de programação e roteamento de navios dos problemas clássicos de roteamento de veículos:

- Os navios se diferem uns dos outros em suas características físicas, operacionais e na sua estrutura de custos. Estão sujeitos as oscilações do mercado de fretes, o que pode levar a distorções, como por exemplo, navios muito semelhantes com fretes muito distintos.
- Navios não voltam necessariamente para as suas origens e estão em constante movimento.
- A programação de navios está sujeita a muitas incertezas, principalmente aquelas decorrentes das condições meteorológicas e de mar.
- Navios operam 24 horas por dia e nos 365 dias do ano; logo, não há período ocioso que possa ser usado para absorver eventuais atrasos nas suas operações.
- A operação do navio permite que ele altere sua rota e seu destino enquanto ele navega.

Hoff *et al.* (2010) complementam que operações marítimas têm tipicamente uma estrutura contínua de coleta-e-entrega, sem depósitos finais, enquanto que o modal rodoviário normalmente apresenta operações ou de coleta ou de entrega a partir de um depósito central. Os tempos envolvidos e as incertezas associadas a navegação marítima certamente são maiores que no modal rodoviário, cujas incertezas estão normalmente associadas ao congestionamento urbano. As diferenças mais perceptíveis entre o modal marítimo para os demais estão relacionadas a sua escala, custos e receitas, os quais são comparativamente muito maiores. Em seu trabalho, ressaltam que a literatura sobre roteamento de navios é bem menor que a literatura sobre transporte rodoviário e se concentra mais no modo *industrial*.

Lawrence (1972, *apud* Christiansen *et al.*, 2004) explica os três modos de operação marítima: *industrial*, *tramp* e *liner*. No *industrial*, o operador da frota controla sua operação de modo a oferecer o serviço a um custo mínimo e normalmente as cargas são todas obrigatórias. No *tramp*, há carregamentos rotineiros ou contratuais, bem como o carregamento de cargas *spots* (opcionais) que visam maximizar o lucro do transportador. *Liners* operam com horários e itinerários previamente determinados e conhecidos.

Pelas características descritas, o caso aqui estudado tem operação do tipo *industrial*, pois as petroleiras ou são proprietárias dos navios ou contratam os navios por tempo (contratos TCP) ou contratam o transporte da sua produção, e quem estiver operando a frota sempre terá foco no custo mínimo unitário de transporte.

Christiansen e Fagerholt (2014) apresentam um modelo para o problema de coleta-e-entrega com janelas de tempo aplicado ao modo *tramp*. Esse modelo maximiza o lucro da operação da frota e a função objetivo é composta por quatro termos: 1) receitas obtidas com o transporte de cargas obrigatórias; 2) receitas obtidas com o transporte de cargas *spots*; 3) custos variáveis de navegação; e, 4) custos com afretamento de navios *spots*. O modo *industrial* pode ser considerado um caso particular do modo *tramp*. Logo, para se chegar à função objetivo do caso *industrial*, os dois primeiros termos que se referem a receitas podem ser desconsiderados e esta se resumirá a minimizar os custos operacionais e eventuais afretamentos suplementares.

Brown *et al.* (1987) apresentam um problema de programação de navios petroleiros, onde são considerados os custos da frota, custos de oportunidade, de

sobrestadia, de combustível, de taxas portuárias e de travessias em canais. O modelo determina as velocidades ideais dos navios, as melhores rotas quando o navio estiver navegando em lastro (vazio), quais cargas devem ser carregadas e quando há necessidade de afretar um navio *spot*. Por fim, todas as programações possíveis são geradas, com seus custos devidamente determinados e então a melhor programação é escolhida.

As diversas variantes e um maior detalhamento dos problemas envolvendo o roteamento e a programação de navios podem ser consultados nos trabalhos de Ronen (1983), Ronen (1993), Christiansen *et al.* (2004), Andersson *et al.* (2010), Hennig *et al.* (2011), Christiansen *et al.* (2013) e Christiansen e Fagerholt (2014).

3.4. Roteamento de navios no alívio de plataformas de petróleo

Na indústria petrolífera, particularmente no processo de alívio de plataformas, Rodrigues *et al.* (2016) propõem um modelo de programação linear inteira mista baseado nas equações clássicas dos problemas de PDPTW (apresentados na Seção 3.2), tendo como referência principal o trabalho de Cordeau *et al.* (2007).

Tendo como base a modelagem proposta por Rodrigues *et al.* (2016), foram implementadas as particularidades do processo de alívios de petróleos destinados à exportação. Pelo fato deste processo já ter uma frota especializada dedicada, foi possível simplificar questões relacionadas a calado, tamanho do navio e posicionamento dinâmico. Este trabalho propõe uma modelagem para descrever a necessidade do mesmo navio aliviar o mesmo lote quando formado por dois alívios distintos e propõe adaptações que buscam diminuir o tempo de processamento e facilitar a convergência do algoritmo pelo método exato, sem descaracterizar o problema em questão.

É importante ressaltar que o ponto de partida para este trabalho poderia ser a formulação apresentada por Christiansen e Fagerholt (2014) para o modo de operação *tramp*, com simplificações para o modo *industrial*. Optou-se por referenciar e ter como base o trabalho de Rodrigues *et al.* (2016) pela proximidade do tema, ou seja, pelo fato destes autores focarem exclusivamente no alívio de plataformas, objeto deste estudo.

4 Modelagem Matemática

Neste capítulo é apresentada a estruturação do problema, são definidos os dados de entrada, conjuntos, parâmetros e variáveis do modelo, assim como é apresentada a formulação matemática do problema de coleta-e-entrega e janelas de tempo aplicado ao processo de exportação de petróleo.

4.1. Estruturação do problema

O problema está estruturado da seguinte forma:

- 1) Objetivo: minimização dos custos de consumo de *bunker*
- 2) Dados de entrada dos navios (frota heterogênea):
 - Número de navios aliviadores.
 - Consumo individual de *bunker*.
 - Velocidade individual média.
 - Capacidade individual de carga.
- 3) Dados de entrada das plataformas (onde faz a coleta) e terminais (onde faz a entrega):
 - Matriz de distâncias entre plataformas e terminais.
- 4) Dados dos alívios (pares coleta/entrega):
 - Data do alívio:
 - i. Abertura da janela de alívio.
 - ii. Fechamento da janela de alívio.
 - Plataforma de origem do alívio.
 - Tempo de serviço na plataforma do alívio.
 - Volume a ser aliviado na plataforma.
 - *Tag* da exportação correspondente.
 - Terminal de destino do alívio.

- Data do descarregamento:
 - i. Abertura da janela de descarregamento.
 - ii. Fechamento da janela de descarregamento.
- Volume a ser descarregado no terminal.
- Tempo de serviço no terminal.

4.2. Variáveis, conjuntos e parâmetros

As variáveis de decisão utilizadas no modelo são dadas na Tabela 1:

Tabela 1: Variáveis de decisão.

Símbolo	Descrição
X_{ijk}	Variável binária que indica se o navio k percorre (1) ou não (0) um arco (i,j) .
B_{ik}	Variável que indica o início de serviço no nó i pelo navio k .
Q_{ik}	Variável que indica a quantidade de petróleo total carregada no navio k , imediatamente após sua visita no nó i .

Fonte: Autor

Os conjuntos e parâmetros utilizados no modelo matemático são dados na Tabela 2:

Tabela 2: Conjuntos e parâmetros.

Símbolo	Descrição
K	Conjunto formado pelos navios, sendo k o índice de cada navio ($k \in K$)
a	Representa o número de alívios (pares coleta/entrega)
$P = \{1, 2, \dots, a\}$	Conjunto formado pelas plataformas (onde coleta)
$D = \{1+a, 2+a, \dots, 2a\}$	Conjunto formado pelos terminais (onde entrega)
$ST = \{s_1, \dots, s_k\}$	Conjunto formado pelas posições iniciais de cada navio
$EN = \{en_1, \dots, en_k\}$	Conjunto formado pelas posições finais de cada navio
TG	Conjunto de lotes de exportação formados por um único alívio ($TG \subset P$)

$N = P U D U S T U E N$	Conjunto de todos os pontos operacionais
$A = \{(i, j) : i, j \in N\}$	Representa todas as arestas que ligam os pontos operacionais entre si
t_{ij}	Representa o tempo de deslocamento do nó i para o nó j (dias)
ts_i	Representa o tempo de serviço no nó i (dias)
$[e_i, l_i]$	Representa a janela de tempo no nó i , com início em e_i e fim em l_i
Cap_k	Representa a capacidade de transporte do navio k (milhões de barris)
q_i	Representa o volume aliviado no nó i (milhões de barris) e entregue no nó $(i+a)$. Foi adotada a convenção, $q_i = -q_{i+a}$
cm_k	Representa o consumo médio do navio k navegando (ton <i>bunker</i> /mi navegada)
v_k	Representa a velocidade do navio k navegando (<i>knots</i>)
$dist_{ij}$	Representa a distância entre o nó i e o nó j (mi)
tag_r	Representa o lote de exportação r (formado por um ou dois alívios)
cb	Representa o custo do <i>bunker</i> (US\$/ton <i>bunker</i>)
esp	Representa o tempo máximo em que há obrigatoriedade do mesmo navio aliviador esperar o segundo alívio do mesmo lote (d)
M	Representa um número suficientemente grande

Fonte: Autor

4.3. Modelagem do problema

Neste trabalho, a função objetivo (4.1) minimiza exclusivamente o somatório dos custos relacionados ao consumo de *bunker* em função das distâncias percorridas. Foi considerada uma média deste consumo, não levando em conta se o navio está navegando carregado ou se está navegando em lastro. Todos estes navios ou pertencem a frota própria da empresa ou são contratados por tempo na modalidade TCP, logo os custos de investimento ou aluguel não se aplicam a nenhum fator dentro da função objetivo. Também não foram levados em consideração os custos de atracação. Conforme Ronen (2011), uma embarcação de grande porte pode consumir até US\$ 100.000 de *bunker* por dia e isso pode

equivaler a até 75% dos seus custos operacionais. Logo, foi considerado que este custo é relevante o suficiente para ser um direcionador da função objetivo.

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} cm_k \text{ dist}_{ij} \text{ cb } x_{ijk} \quad (4.1)$$

As variáveis de decisão do modelo são dadas por:

$$Q_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in N \quad \forall k \in K \quad (4.2)$$

$$B_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in N \quad \forall k \in K \quad (4.3)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in (STUPUD) \quad \forall j \in (PUD \cup EN) \quad \forall k \in K \quad (4.4)$$

A variável Q_{ik} (4.2) indica a carga carregada no navio k após visita em i e a variável B_{ik} (4.3) indica o momento que o navio k inicia o serviço em i . Ambas devem ser não-negativas, enquanto que a variável x_{ijk} (4.4) assume o valor 1 se o navio k percorre o arco (i,j) ; ou, assume 0, caso contrário.

As Restrições (4.5) a (4.19) foram retiradas do trabalho de Rodrigues *et al.* (2016) e utilizadas neste estudo. As restrições relacionadas a calado, tamanho da embarcação, posicionamento dinâmico e demais restrições utilizadas pelos autores não foram necessárias, pelos motivos já citados anteriormente.

$$\sum_{j \in (PUD \cup EN)} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in (STUPUD) \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in (STUPUD)} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in (PUD \cup EN) \quad (4.6)$$

$$\sum_{j \in (PUen_k)} x_{sjk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4.7)$$

$$\sum_{i \in (S_kUD)} x_{ien_k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4.8)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 0 \quad \forall j \in ST \quad (4.9)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in EN \quad (4.10)$$

$$\sum_{i \in (PUD \cup S_k)} x_{ihk} - \sum_{j \in (PUD \cup en_k)} x_{hjk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall h \in P \cup D \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.11)$$

$$e_i \left(\sum_{j \in N} x_{jik} \right) \leq B_{ik} \leq l_i \left(\sum_{j \in N} x_{jik} \right) \quad \begin{array}{l} \forall i \in (P \cup D \cup EN) \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.12)$$

$$e_i \left(\sum_{j \in N} x_{s_kjk} \right) \leq B_{s_kk} \leq l_i \left(\sum_{j \in N} x_{s_kjk} \right) \quad \begin{array}{l} \forall s_k \in ST \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.13)$$

$$B_{a+j,k} \geq B_{j,k} \quad \begin{array}{l} \forall j \in P \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.14)$$

$$B_{jk} \geq B_{ik} + t_{ij} + ts_i + (x_{ijk} - 1) M \quad \begin{array}{l} \forall i \in (ST \cup P \cup D) \\ \forall j \in (P \cup D \cup EN) \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.15)$$

$$Q_{jk} \geq Q_{ik} + q_j + (x_{ijk} - 1) M \quad \begin{array}{l} \forall i \in (ST \cup P \cup D) \\ \forall j \in (P \cup D \cup EN) \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.16)$$

$$\sum_{i \in (ST \cup P \cup D)} x_{ihk} = \sum_{j \in N} x_{j,a+h,k} \quad \begin{array}{l} \forall h \in P \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.17)$$

$$Q_{jk} \leq Cap_k \sum_{i \in (S_k \cup P \cup D)} x_{ijk} \quad \begin{array}{l} \forall j \in (P \cup D \cup en_k) \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.18)$$

$$Q_{s_kk} + Q_{en_kk} = 0 \quad \forall k \in K \quad (4.19)$$

As Restrições (4.20) foram propostas neste trabalho para a correta formação de lotes de exportação a partir de dois alívios consecutivos. As Restrições (4.21), (4.22) e (4.23) são cortes propostos neste trabalho para melhorar o desempenho computacional do algoritmo.

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \begin{array}{l} \forall i \in P \\ \forall j \in P \\ \{(tag_i = tag_j) \\ \& (i \neq j) \\ \& (|e_i - e_j| \leq esp) \\ \& (e_j > e_i)\} \end{array} \quad (4.20)$$

$$\sum_{k \in K} x_{j,i+a,k} = 1 \quad \begin{array}{l} \forall i \in P \\ \forall j \in P \\ \{(tag_i = tag_j) \\ \& (i \neq j) \\ \& (|e_i - e_j| \leq esp) \\ \& (e_j > e_i)\} \end{array} \quad (4.21)$$

$$\sum_{k \in K} x_{i+a,j+a,k} = 1 \quad \begin{array}{l} \forall i \in P \\ \forall j \in P \\ \{(tag_i = tag_j) \\ \& (i \neq j) \\ \& (|e_i - e_j| \leq esp) \\ \& (e_j > e_i)\} \end{array} \quad (4.22)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \begin{array}{l} \{\forall i \in TG \\ \& (j = i + a)\} \end{array} \quad (4.23)$$

As Restrições (4.5) e (4.6) garantem que todos os pontos operacionais sejam visitados exatamente uma vez, com o arco saindo de i e chegando em j .

A Restrições (4.7) obrigam que todos os navios saiam de sua posição inicial e se desloquem para uma coleta (plataforma) ou para sua posição final, enquanto (4.8) obrigam que todos os navios cheguem em um destino (terminal) ou na posição final. A combinação destas duas restrições permite que um ou mais navios se desloquem da posição inicial diretamente para a posição final sem fazer qualquer alívio (e sem qualquer custo associado). Essa possibilidade é importante, pois os navios com maior consumo ou posicionados inicialmente num local mais distante tendem a ser menos utilizados, permitindo que o programador do dia-a-dia tenha a visão da capacidade e/ou ociosidade de sua frota. As Restrições (4.9) garantem que os navios saiam de seus pontos iniciais e não retornem, enquanto que em (4.10) garantem que os navios cheguem nos seus pontos finais e não retornem. As Restrições (4.11) conservam o fluxo (fazem a movimentação) dos navios.

As Restrições (4.12) e (4.13) conjuntamente garantem que as janelas de tempo sejam respeitadas desde os pontos iniciais até os pontos finais, enquanto que em (4.14) as coletas devem ser realizadas antes das entregas. Em (4.15), temos que

o momento de início do serviço em j deve ser maior que o momento de saída em i somados o tempo de deslocamento do arco (i,j) mais o tempo de serviço em i .

As Restrições (4.16) se referem ao balanço de carga dos navios, enquanto que as Restrições (4.17) garantem que o navio que coletou carga em uma plataforma h , faça a descarga no terminal respectivo $(h+a)$. Em (4.18) são respeitadas as capacidades máximas de carregamento de cada navio e em (4.19) asseguram-se que os navios iniciam e terminam suas rotas vazios.

As Restrições (4.20) estão relacionadas a formação de um lote de exportação a partir de dois alívios consecutivos. Neste caso, teremos um mesmo tag_r identificando os dois alívios. Caso a diferença de tempo entre a abertura de uma janela e outra seja menor que um tempo de espera mínimo (esp), haverá obrigatoriedade de o mesmo navio fazer o alívio das duas cargas. Sempre que esta diferença de tempo for menor que 2 ou 3 dias, é vantajoso que o mesmo navio aguarde pelo alívio da segunda parcela do lote (neste estudo, esp foi fixado em 2 dias). Isso se dá pelos longos tempos de navegação e de serviço envolvidos e pelas vantagens já elencadas de fazer o transbordo no terminal de exportação de um lote utilizando o mesmo aliviador, mesmo quando provenientes de dois alívios distintos. Normalmente este tempo é definido pelo programador com base na sua experiência e eventos externos que possam impactar na programação (mau tempo, por exemplo). Para que não ocorram problemas de perdas reais de janela de tempo, sempre o primeiro alívio do navio será aquele mais cedo na linha do tempo, enquanto que o segundo alívio será sempre o posterior.

As Restrições (4.21) e (4.22) são cortes desenvolvidos e implementados nesta modelagem para reforçar o conceito de precedência imposto nas Equações (4.17) no que se refere a um lote formado por dois alívios, restringindo o conjunto de soluções e assim proporcionando um ganho de desempenho no algoritmo.

As Restrições (4.23) também são cortes adicionais que tratam especificamente de lotes formados por um único alívio e obrigam que a coleta e entrega seja prontamente executada por um dos navios disponíveis. O critério utilizado é a existência de um tag_r único e exclusivo no conjunto de alívios.

4.4. Fixação de variáveis

Nos trabalhos de Rodrigues (2014) e Furtado (2016) são fixadas algumas variáveis como forma de simplificar a resolução do problema. Sua função é de eliminar arcos inexistentes ou garantir que não ocorram movimentações que sabe-se de antemão que não podem ocorrer. Devido ao ganho de desempenho no algoritmo, diminuindo o tamanho da relaxação linear do modelo, estas foram mantidas na formulação (o ganho de desempenho específico da fixação de variáveis não foi mensurado neste trabalho). A fixação das variáveis (4.4.20) foi desenvolvida e é exclusiva para o processo de alívios de petróleo para exportação. As regras são dadas abaixo:

- Evitar que os navios se desloquem entre suas posições iniciais:

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in ST \\ \forall j \in N \\ \forall k \in K \\ \forall i \neq s_k \end{array} \quad (4.4.1)$$

- Evitar que os navios se desloquem entre as posições finais:

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in N \\ \forall j \in EN \\ \forall k \in K \\ \forall i \neq en_k \end{array} \quad (4.4.2)$$

- Evitar que o navio passe antes pela entrega da respectiva coleta:

$$x_{a+i,i,k} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in P \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.4.3)$$

- Evitar que o navio vá vazio para uma entrega:

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in N \\ \forall j \in D \\ \forall k \in K \\ \forall i = s_k \end{array} \quad (4.4.4)$$

- Evitar que o navio vá de uma coleta diretamente para sua posição final:

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in P \\ \forall j \in N \\ \forall k \in K \\ \forall j = en_k \end{array} \quad (4.4.5)$$

- Evitar que o navio vá de um ponto para este mesmo ponto:

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in N \\ \forall j \in N \\ \forall k \in K \\ \forall i = j \end{array} \quad (4.4.6)$$

- Evitar que navios se desloquem para janelas a qual não conseguem chegar a tempo:

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in N \\ \forall j \in N \\ \forall k \in K \\ \text{se } e_i + d_i + t_{ij} > \\ l_j \text{ e } dist_{ij} \neq 0 \end{array} \quad (4.4.7)$$

- Garantir que os navios comecem suas rotas vazios:

$$Q_{ik} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in ST \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.4.8)$$

- Garantir que os navios terminem suas rotas vazios.

$$Q_{ik} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in EN \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.4.9)$$

- Garantir que os navios saiam no início da janela de tempo de suas posições iniciais.

$$B_{ik} = e_i \quad \begin{array}{l} \forall i \in ST \\ \forall k \in K \\ \forall i = s_k \end{array} \quad (4.4.10)$$

- Evitar que navios se desloquem entre pontos operacionais onde a carga a ser entregue supera sua capacidade.

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in D \\ \forall j \in D \\ \forall k \in K \\ (-q_i - q_j) > Cap_k \end{array} \quad (4.4.11)$$

- Evitar que navios se desloquem entre pontos operacionais onde a carga a ser coletada supera sua capacidade.

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in P \\ \forall j \in P \\ \forall k \in K \\ (q_i + q_j) > Cap_k \end{array} \quad (4.4.12)$$

- Evitar que um navio saia de sua posição inicial e se desloque para a posição inicial de outro navio.

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in ST \\ \forall j \in ST \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.4.13)$$

- Evitar que um navio saia de sua posição final e se desloque para a posição final de outro navio.

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in EN \\ \forall j \in EN \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.4.14)$$

- Evitar que um navio se desloque de sua posição inicial para a posição final de outro navio.

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in ST \\ \forall j \in EN \\ \forall k \in K \\ j \neq (i + 2a + |K|) \end{array} \quad (4.4.15)$$

- Evitar o deslocamento das coletas para as posições finais.

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in P \\ \forall j \in EN \\ \forall k \in K \\ k \neq (i - 2a - |K|) \\ i \neq (j - 2a - |K|) \end{array} \quad (4.4.16)$$

- Evitar o retorno para as posições iniciais.

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in N \\ \forall j \in ST \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.4.17)$$

- Evitar a saída das posições finais.

$$x_{ijk} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in EN \\ \forall j \in N \\ \forall k \in K \end{array} \quad (4.4.18)$$

- Evitar o deslocamento para janelas já fechadas.

$$x_{jik} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in (P \cup D) \\ \forall j \in (P \cup D) \\ \forall k \in K \\ \forall e_j > l_i \end{array} \quad (4.4.19)$$

- Evitar o deslocamento no sentido terminal-plataforma quando o carregamento é de um lote único no sentido plataforma-terminal.

$$x_{jik} = 0 \quad \begin{array}{l} \forall i \in TG \\ \forall k \in K \\ \forall j = i + a \end{array} \quad (4.4.20)$$

5 Resultados obtidos

Este capítulo apresenta e analisa os resultados da aplicação do modelo matemático, partindo-se de um cenário para testar o modelo implementando e posteriormente cenários que representam quatros meses de programação real da empresa estudada, de alívios de petróleo comprometidos para exportação.

5.1. Aplicação do modelo

O modelo proposto foi resolvido utilizando-se a linguagem de programação Julia (Bezanson *et al.*, 2017), versão 1.0.5, a biblioteca JuMP (Dunning *et al.*, 2017), versão 0.21.1 e o solver comercial Gurobi 9.0.2 (www.gurobi.com). Para o processamento foi utilizada uma estação com um processador Intel Core i7-8700K, com CPU 3.7 GHz e 64 GB de memória RAM (habilitado apenas um núcleo para a resolução).

Inicialmente foi implementada uma base de dados reduzida para teste, com o objetivo de analisar e apresentar detalhadamente os resultados do modelo. Posteriormente foram testados 4 meses de dados de programação realística da empresa estudada. Em todas as situações, foram analisadas a primeira solução factível e a melhor solução encontrada, sempre limitando o tempo de processamento em 10 minutos (600 segundos) para cada mês. Este tempo foi arbitrado para representar um tempo razoável de espera que um programador pode aguardar por uma resposta de um modelo dentro da sua rotina de trabalho.

5.2. Base de dados reduzida para testes

Para verificar o funcionamento do modelo, foi elaborada uma base de dados reduzida composta por 4 navios (Tabela 3) e 10 alívios (Tabela 4). Os dados das posições iniciais dos navios (localização e data de disponibilidade para operação) são apresentados na Tabela 5. Os dados de abertura e fechamento das janelas para

entrega nos terminais são suficientemente grandes para que o modelo tenha flexibilidade para fazer qualquer movimentação. Os consumos de *bunker* dos navios são fictícios e propositalmente foram colocados dois navios com consumos bem distintos, um com consumo bem elevado (Navio1 com 0,24 ton/mi) e outro com consumo bem menor que os demais (Navio3 com 0,14 ton/mi), para verificar o comportamento do modelo.

Tabela 3: Dados dos navios utilizados para o teste.

Navio	Capacidade Máxima (milhões bbl)	Consumo de bunker (ton bunker/mi) (*)	Velocidade média (milha/h)
Navio1	1,0	0,24	15,0
Navio2	1,0	0,18	13,5
Navio3	1,0	0,14	12
Navio4	1,0	0,19	14,5

(*) consumos fictícios para testar o modelo

Fonte: o autor

Tabela 4: Dados dos alívios utilizados para o teste.

Alívio	Abertura da janela (origem)	Fechamento da janela (origem)	Plataforma (origem)	Volume de Alívio (milhões de bbl)	Tag do lote	Terminal (destino)	Tempo de Serviço na Origem (d)	Tempo de Serviço no Destino (d)
a1	8/1/20	10/1/20	P-14	0,5	Exp_01	T-01	0,73	0,73
a2	7/1/20	9/1/20	P-21	0,5	Exp_01	T-01	0,92	0,73
a3	11/1/20	13/1/20	P-40	0,5	Exp_02	T-01	0,92	0,73
a4	12/1/20	14/1/20	P-41	0,5	Exp_02	T-01	0,92	0,73
a5	9/1/20	11/1/20	P-18	1	Exp_03	T-02	1,50	1,75
a6	14/1/20	16/1/20	P-17	1	Exp_04	T-01	1,52	1,40
a7	16/1/20	18/1/20	P-26	0,5	Exp_05	T-01	0,92	0,73
a8	20/1/20	22/1/20	P-40	0,5	Exp_06	T-02	0,92	0,92
a9	18/1/20	20/1/20	P-41	0,5	Exp_06	T-02	0,92	0,92
a10	20/1/20	22/1/20	P-23	0,5	Exp_05	T-01	0,92	0,73

Fonte: o autor

Os alívios apresentados na Tabela 4 são compostos por dois alívios de lotes inteiros de *tag* único (Exp_03 e Exp_04), três lotes compostos por dois alívios e $esp \leq 2$ dias, ou seja, obrigatoriamente os alívios do mesmo lote devem ser executados pelo mesmo navio (Exp_01, Exp_02 e Exp_06) e um lote composto por dois alívios e $esp > 2$ dias, ou seja, sem obrigatoriedade dos alívios serem

executados pelo mesmo navio (Exp_05). Propositalmente os dados não foram colocados em ordem cronológica.

Tabela 5: Dados das posições iniciais utilizadas para o teste.

Navio	Data de Disponibilização	Posição Inicial
Navio1	5/1/20	T-01
Navio2	5/1/20	P-18
Navio3	6/1/20	P-40
Navio4	6/1/20	T-01

Fonte: o autor

5.2.1.

Primeira solução factível encontrada para os testes

A primeira solução factível do teste foi encontrada em 0,02 segundos de processamento, com uma função objetivo de US\$ 174.770, que se refere exclusivamente ao consumo de bunker da frota e um gap de 23,4%. Foi considerado um custo de US\$ 500,00 por tonelada de *bunker* (Rio de Janeiro *VLSFO máx 0.5% Price*: média de Jan/20 a Mar/20 – Oil Monster, 2020). Em virtude de ter somente 10 alívios ofertados para uma frota de 4 navios, era esperado que algum navio não fosse utilizado. Assim ocorreu, o navio de mais alto consumo de *bunker* (Navio1) não foi utilizado em nenhum alívio e foi diretamente da posição inicial para a posição final.

As operações do Navio2 estão representadas na Figura 8. Inicialmente o navio estava localizado junto a plataforma P-18 em 05/01 (posição inicial) e o modelo optou por mantê-lo aguardando nesta localização até a abertura da janela de alívio da plataforma P-18 em 09/01. Após 1,5 dias de serviço nesta plataforma (amarração, bombeio e desamarração), este navio navegou por 0,5 dias e chegou no terminal T-02, onde ficou 1,75 dias em serviço (entrada, bombeio e saída do terminal). Após, o modelo optou por não mais utilizá-lo e o enviou para a posição final.

As operações do Navio3 estão representadas na Figura 9. Por ser o navio mais econômico (menor consumo de *bunker*), o modelo optou por utilizá-lo na quantidade máxima possível de alívios. A maior espera deste navio foi de 2,3 dias, enquanto aguardava a abertura da janela da P-41 que ocorreria em 18/01. Em termos práticos, esta espera é bem pequena e, em condições reais, dificilmente este navio

conseguiria fazer qualquer outro alívio neste curto período de tempo. Interessante observar que no alívio *a3* (P-40 com abertura da janela em 11/01) e no alívio *a4* (P-41 com abertura da janela em 12/01), o navio chegou para operar quando a janela já estava aberta. Isso mostra que corretamente os navios estão aguardando a abertura das janelas ou chegando após a abertura das janelas e não após o fechamento destas. Os alívios da Tabela 4 não estavam em ordem cronológica e mesmo assim, ao aliviar o mesmo lote em duas plataformas diferentes, os navios seguiram rigorosamente a ordem das datas, conforme modelagem.

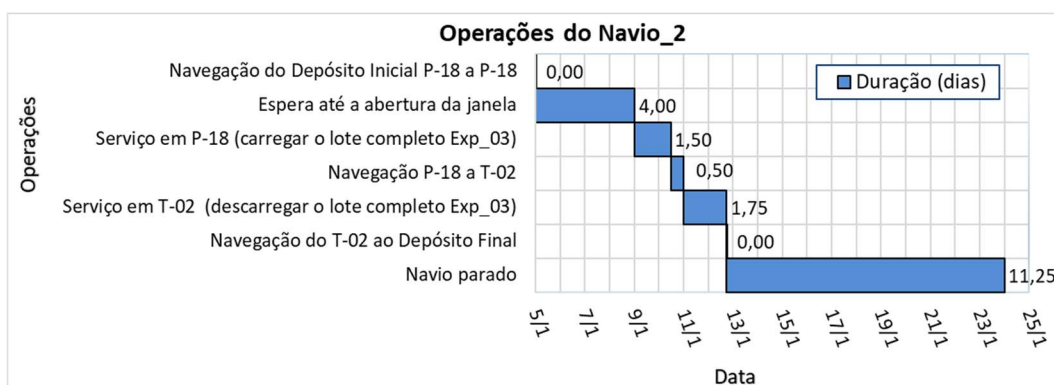


Figura 8 – Operações do Navio2 na primeira solução factível encontrada

Fonte: o autor

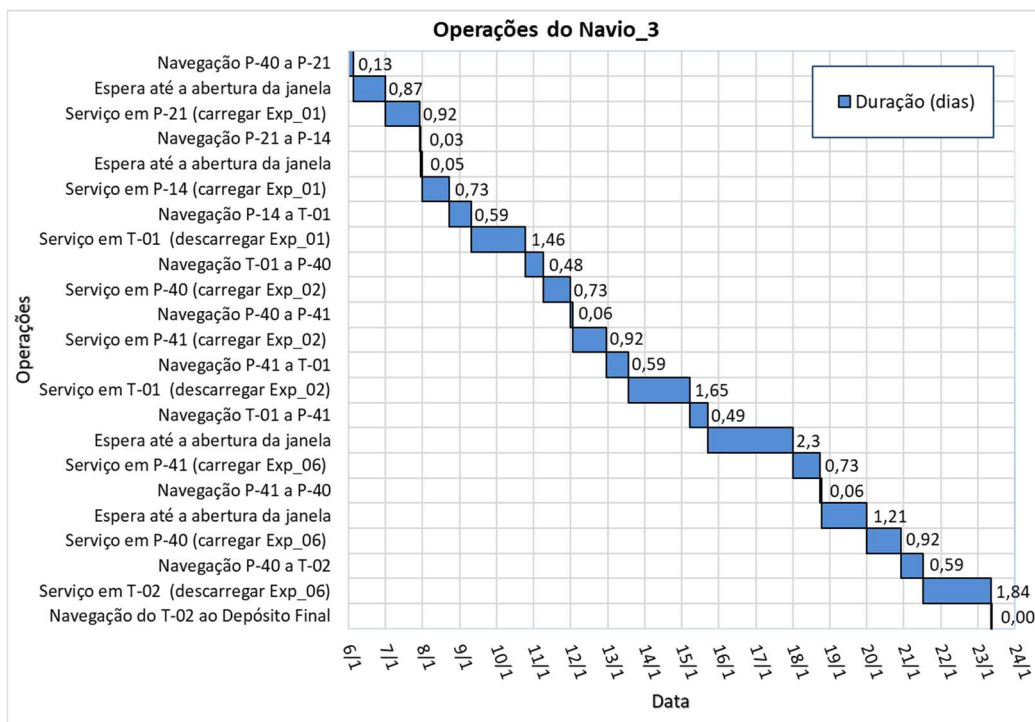


Figura 9 – Operações do Navio3 na primeira solução factível encontrada

Fonte: o autor

As operações do Navio4 estão representadas na Figura 10. Este navio ficou parado por 7,49 dias aguardando sua primeira operação. A exportação Exp_05 estava dividida em dois alívios e com $esp > 2$ dias (alívios *a7* e *a10* na Tabela 4). Neste caso, não havia obrigatoriedade do mesmo navio aliviador esperar o segundo alívio do mesmo lote e o modelo optou por fazer duas viagens para o terminal com o mesmo navio e com meia carga em cada viagem, o que claramente não é uma operação otimizada (esta é a primeira solução encontrada pelo modelo).

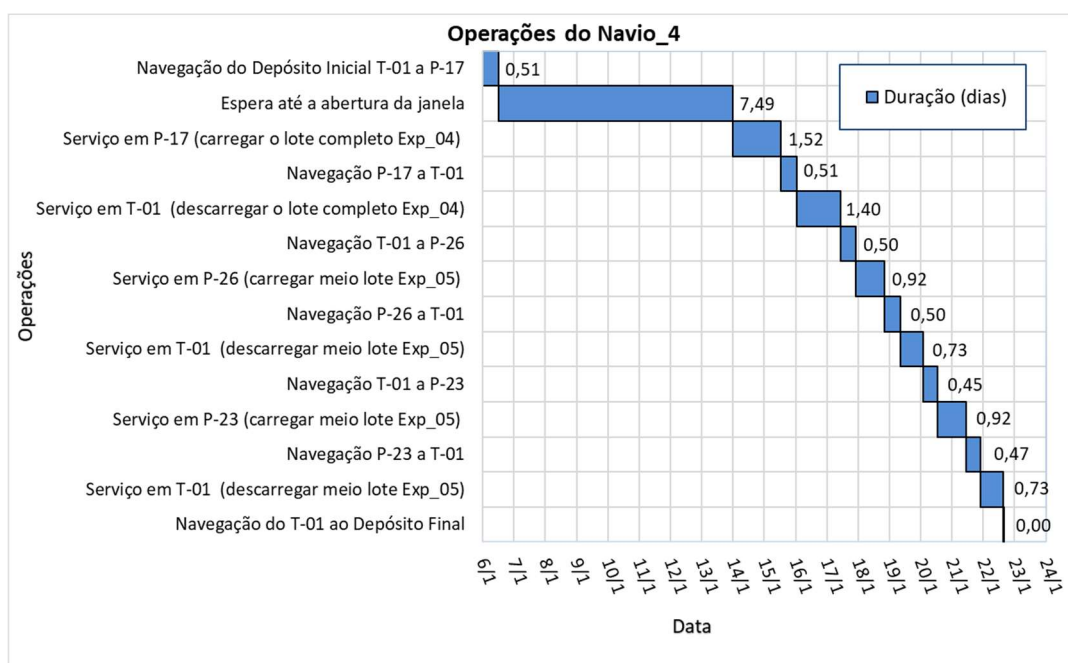


Figura 10 – Operações do Navio4 na primeira solução factível encontrada

Fonte: o autor

5.2.2.

Melhor solução encontrada para os testes

A melhor solução encontrada para os testes foi com 0,72 segundos de processamento, resultando numa função objetivo de US\$ 140.540 e um gap de 0,0%. Neste cenário, os navios menos econômicos (Navio1 e Navio4) não foram utilizados em nenhum alívio, sendo que ambos foram da posição inicial diretamente para a posição final. Comparando-se a primeira solução com a melhor solução encontrada, houve uma queda de mais de 20% na função objetivo e esta queda foi

motivada principalmente pela opção do modelo de otimizar a operação com somente os dois navios mais econômicos.

As operações do Navio2 estão representadas na Figura 11. Como se observa, ele ficou pouco tempo parado. A maior espera foi de 4,0 dias até a abertura da janela do primeiro alívio, sendo que não havia outra opção de alívio durante esta espera.

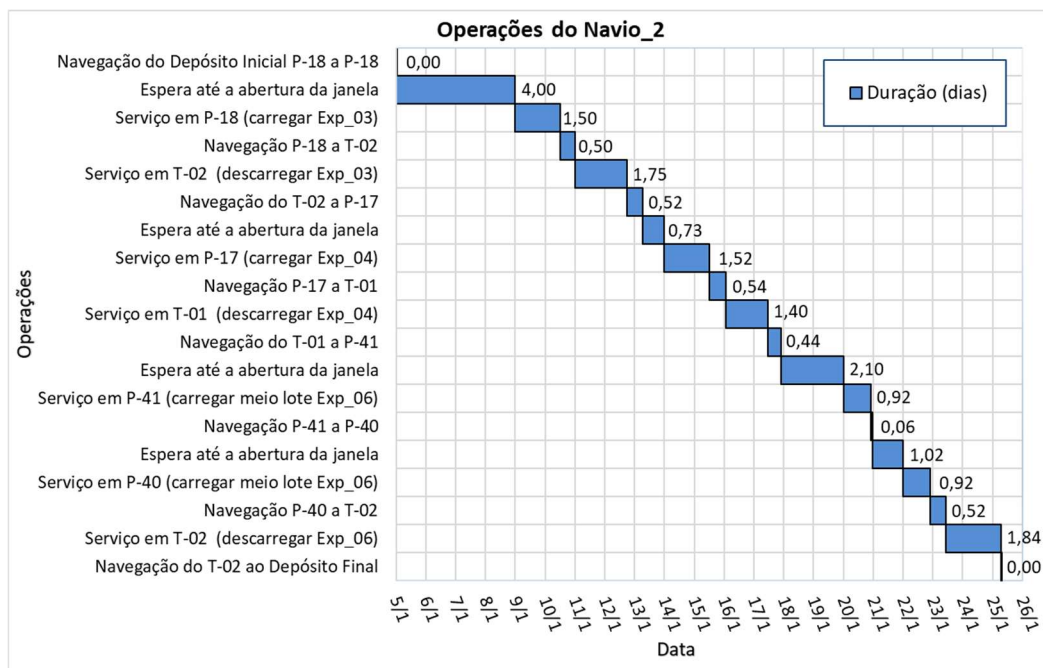


Figura 11 – Operações do Navio2 na melhor solução encontrada

Fonte: o autor

As operações do Navio3 estão representadas na Figura 12. Como se observa, o modelo optou por utilizá-lo na quantidade máxima possível de alívios novamente, pois é o navio mais econômico da frota.

Deve-se ressaltar que na solução ótima, a exportação Exp_05, que estava dividida em dois alívios e com $esp > 2$ dias (alívios *a7* e *a10* na Tabela 4), foi executada pelo mesmo navio na mesma viagem, ou seja, o navio carregou a primeira metade do lote e aguardou 2,98 dias até a abertura da janela do alívio do restante do lote em 22/01, mostrando que o modelo otimizou corretamente.

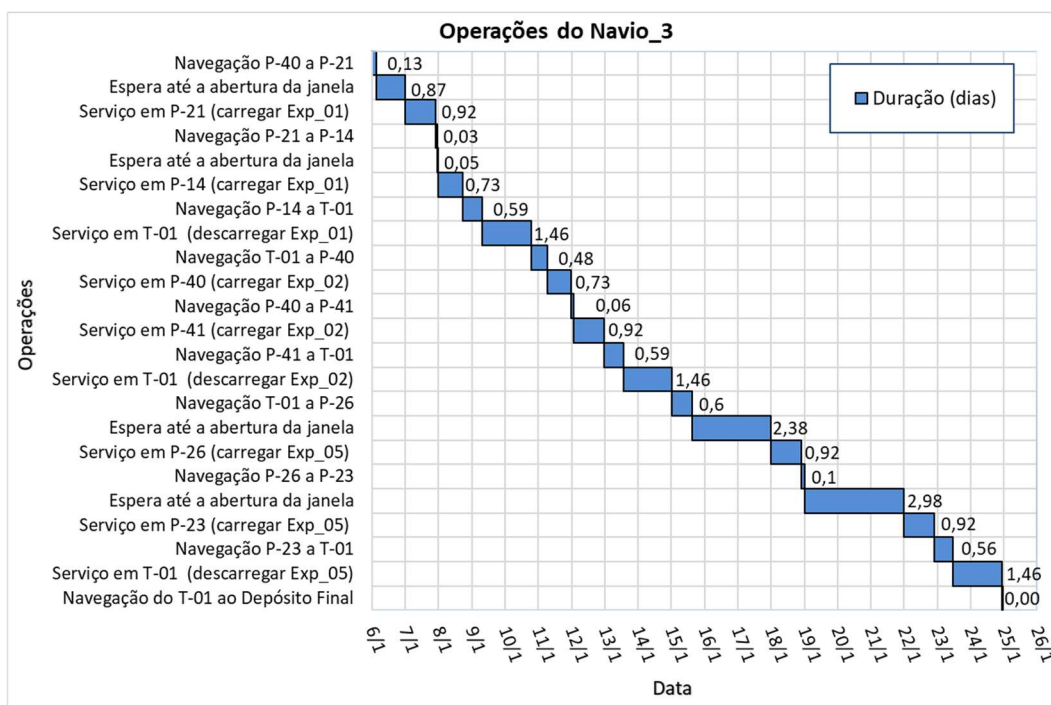


Figura 12 – Operações do Navio3 na melhor solução encontrada

Fonte: o autor

5.2.3. Conclusões dos testes iniciais

Os resultados da utilização da base de testes foram apresentados de forma detalhada e ficou demonstrado que o modelo está funcionando corretamente e seu potencial de otimização. Vale ressaltar, que foram feitos diversos outros cenários para testar o modelo. Todas as análises dos resultados foram executadas seguindo o desenvolvimento apresentado anteriormente e todas mostraram coerência e um comportamento conforme era esperado do modelo.

5.3. Dados realísticos de programação

Foram testados quatro meses de dados realísticos de programação da empresa estudada, conforme Tabela 6. Em todos os experimentos, foram disponibilizados 6 navios *Suezmax* para utilização pelo modelo.

Tabela 6: Dados utilizados nos experimentos computacionais.

Mês	Nº de Alívios	Lotes com 2 alívios	Lotes com alívio único	Lotes com 2 alívios com <i>esp</i> > 2 dias	Nº de plataformas	Nº de terminais	Volume movimentado (milhões de barris)
1	30	13	4	3	11	3	16,9
2	22	6	10	4	11	1	15,6
3	31	11	9	3	13	3	19,5
4	41	14	13	3	22	3	26,4

Fonte: o autor

A Tabela 7 mostra o resultado da função objetivo, do GAP e do tempo de processamento, dando ênfase para a primeira solução factível encontrada e a melhor solução encontrada num tempo de processamento limitado a 600 segundos.

Tabela 7: Resultados dos experimentos computacionais (FO, GAP e tempo).

Mês	Primeira solução factível encontrada			Melhor solução encontrada em 600 segundos de processamento		
	FO (US\$)	GAP (%)	Tempo (s)	FO (US\$)	GAP (%)	Tempo (s)
1	504.725	18,5	17	495.555	9,5	586
2	459.590	21,2	16	443.540	0,0	191
3	571.095	16,8	11	545.810	7,3	525
4	839.570	20,0	342	796.435	15,1	580

Fonte: o autor

Foi considerado o custo do *bunker* em US\$ 500,00 por tonelada (Rio de Janeiro *VLSFO máx 0.5% Price*: média de Jan/20 a Mar/20 – Oil Monster, 2020). A diferença entre a função objetivo na melhor solução encontrada em 600 segundos e na primeira solução factível encontrada é diretamente o valor economizado em *bunker*. É uma economia mensal da ordem de US\$ 25 mil para o mês 3 e US\$ 43 mil para o mês 4. Os quatro meses somam uma economia de mais de US\$ 93 mil, valor este considerável economicamente, além do benefício ambiental em navegar menos e utilizar primeiramente os navios mais eficientes energeticamente.

A Tabela 8 mostra quantos navios foram utilizados pelo modelo, dando ênfase para a primeira solução factível encontrada e a melhor solução encontrada num tempo de processamento limitado a 600 segundos.

Tabela 8: Resultados dos experimentos computacionais (navios utilizados).

Mês	Navios disponibilizados	Primeira solução factível encontrada	Melhor solução encontrada em 600 segundos de processamento
		Navios utilizados	Navios utilizados
1	6	5	5
2	6	5	3
3	6	6	5
4	6	6	5

Fonte: o autor

No mês 2, a primeira solução foi encontrada utilizando-se 5 navios para fazer os alívios, enquanto que a solução melhorada (*gap* igual a zero em 191 segundos de processamento), utilizou apenas 3 navios, deixando dois navios menos eficientes parados e mostrando o ganho que estes modelos podem trazer.

É importante ressaltar que por muitas vezes apenas ter como resposta a indicação de que uma programação é factível (encontrar a primeira solução) já é suficiente para economizar milhares de dólares, evitando-se previamente o deslocamento desnecessário de navios. A aplicabilidade do modelo na rotina se mostra viável, já que tempo de processamento para encontrar a primeira solução factível variou entre 11 e 342 segundos e respostas melhores podem ser obtidas a depender da disponibilidade de tempo do programador.

A Tabela 9 mostra os resultados dos experimentos computacionais relacionados às Restrições (4.21), (4.22) e (4.23), buscando demonstrar a necessidade destas restrições para diminuir o tempo computacional de resolução deste problema e viabilizar o uso deste modelo na rotina de um programador de navios. Como se observa, dos quatro meses analisados, o modelo não encontrou uma solução factível em 3600 segundos de processamento para dois meses de testes, quando suprimidas estas restrições, demonstrando sua necessidade.

Conforme mencionado anteriormente, a Restrição (4.20) está relacionada à formação de um lote de exportação a partir de dois alívios consecutivos e não pode ser suprimida.

Tabela 9: Impacto no tempo de processamento com e sem as Restrições (4.21), (4.22) e (4.23).

Mês	Primeira solução factível encontrada			Primeira solução factível encontrada, quando suprimidas as restrições (4.21), (4.22) e (4.23)		
	FO (US\$)	GAP (%)	Tempo (s)	FO (US\$)	GAP (%)	Tempo (s)
1	504.725	18,5	17	-- (*)	-- (*)	-- (*)
2	459.590	21,2	16	471.070	32,3	124
3	571.095	16,8	11	-- (*)	-- (*)	-- (*)
4	839.570	20,0	342	839.570	20,0	248

-- (*): Sem resultado factível após 3600 segundos de processamento.

6 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo adaptar uma modelagem existente de roteirização de navios aliviadores de plataformas de petróleo para terminais de consumo, para uma modelagem aplicada a roteirização de navios aliviadores de plataformas, cujos petróleos já estejam previamente compromissados para exportação. As respostas geradas pelo modelo foram satisfatórias e este pode ser incorporado como uma ferramenta na rotina de programação pela área responsável pelo escoamento da produção. As restrições propostas neste estudo (restrições 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23) fizeram o correto encaminhamento dos lotes e facilitaram a convergência do modelo, permitindo sua resolução num tempo de processamento factível para o horizonte estudado e adequado para obter resultados rápidos.

No dia-a-dia da programação de navios aliviadores, esta frota trabalha quase que exclusivamente no processo de transporte do petróleo das plataformas de produção para navios que farão a rota de exportação. Para lotes compostos de dois alívios, sempre é importante utilizar o mesmo aliviador para buscar otimizar o tempo demandado e as manobras no terminal de transbordo.

Para que o processo de roteirização de navios tenha êxito, muitas vezes, apenas ter como resposta a indicação que uma programação é factível já é suficiente para economizar milhares de dólares. A facilidade de se ter um modelo para rapidamente testar diferentes tamanhos de janelas, deslocamentos das janelas existentes, mudança de plataforma de alívio, alterações nas posições iniciais dos navios, a colocação ou retirada de navios, entre outras possibilidades, impacta enorme e positivamente o trabalho da área de programação. Os questionamentos diversos do dia-a-dia podem ser respondidos com mais facilidade, segurança e com embasamento técnico. Novos cenários, por exemplo, gerados a partir de mudanças nas condições climáticas na área de produção, são muito relevantes na tomada de decisão, quando se trabalha com navios de grande capacidade e altíssimo custo operacional.

6.1.Trabalhos futuros

Os trabalhos futuros poderão ser na busca e adaptação de heurísticas ou outros métodos de solução mais rápidos e que de preferência consigam trabalhar com horizontes de programação maiores de dois ou três meses. Para tratar a não-convergência do modelo em determinados cenários, este poderá ser adaptado para maximizar ganhos em função do cumprimento de uma programação determinada.

7

Referências bibliográficas

ANDERSSON, H., HOFF, A., CHRISTIANSEN, M., HASLE, G., LØKKETANGEN, A. **Industrial Aspects and Literature Survey: Combined Inventory Management and Routing**. Computers and Operations Research 37: 1515–1536, 2010.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2019**. 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/2019-anuario-versao-impressao.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **SIGEP - Previsão de Produção**. 2020a. Disponível em: <<http://app.anp.gov.br/anp-cpl-web/public/sigep/consulta-previsao-producao/consulta.xhtml>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Dados Estatísticos**. 2020b. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Exploração e Produção de Óleo e Gás**. 2020c. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas>>. Acesso em: 29 jul. 2020.

ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários. **Anuário Estatístico 2019**. 2019. Disponível em: <<http://portal.antaq.gov.br/wp>>

content/uploads/2020/02/Anuário-2019-vFinal-revisado.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2020.

BALDACCI, R., BARTOLINI, E., MINGOZZI, A., ROBERTI, R. **An Exact Solution Framework for a Broad Class of Vehicle Routing Problems**. *Computational Management Science* 7 (3): 229-268, 2010.

BEZANSON, J., EDELMANZ A., KARPINSKI S., SHAH, V. B., **Julia: a Fresh Approach to Numerical Computing**. *Siam Review* 59 (1): 65–98, 2017.

BRAEKERS, K., RAMAEKERS, K., NIEUWENHUYSE, I., V. **The Vehicle Routing Problem: State of the Art Classification and Review**. *Computers & Industrial Engineering* 99: 300–313, 2016.

BROWN, G. G.; GRAVES, G. W.; RONEN. D. **Scheduling Ocean Transportation of Crude Oil**. *Management Science* 33 (3): 335–346, 1987.

CHRISTIANSEN, M., FAGERHOLT, K., RONEN, D. **Ship Routing and Scheduling: Status and Perspectives**. *Transportation Science* 38: 1-18, 2004.

CHRISTIANSEN, M., FAGERHOLT, K., NYGREEN, B., RONEN, D. **Ship Routing and Scheduling in the New Millennium**. *European Journal of Operational Research* 228: 467-483, 2013.

CHRISTIANSEN, M., FAGERHOLT, K. **Ship Routing and Scheduling in Industrial and Tramp Shipping**. In: *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*. Second Edition, 381-408, 2014.

CLARKE, G., WRIGHT, J. W. **Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points**. *Operations Research* 12: 568–582, 1964.

CORDEAU, J. F., LAPORTE, G., POTVIN, J. Y., SAVELSBERGH, M. W. P. **Transportation on Demand**. In: Handbooks in Operations Research and Management Science. Barnhart, C., Laporte, G., (eds). Elsevier, Vol 14, 429–466, 2007.

CORDEAU, J. F., LAPORTE, G. & ROPKE, S. **Recent Models and Algorithms for One-to-One Pickup and Delivery Problems**. In: The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. Golden, B., Raghavan, S., Wasil, E. (eds). Operations Research/Computer Science Interfaces, pgs. 327–357, 2008.

DANTZIG, G. B., RAMSER, J. H. **The Truck Dispatching Problem**. Management Science 6: 80–92, 1959.

DUMAS, Y., DESROSIERS, J. e SOUMIS, F. **The Pickup and Delivery Problem with Time Windows**. European Journal of Operational Research 54: 7-22, 1991.

DUNNING, I., HUCHETTE J., LUBIN, M. **JuMP: A Modeling Language for Mathematical Optimization**. Siam Review 59 (2): 295-320, 2017.

EIA - U.S. Energy Information Administration. **Petroleum and Other Liquids**. 2020. Disponível em: <<https://www.eia.gov/international/data/world/petroleum-and-other-liquids/annual-refined-petroleum-products-consumption>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

FAGERHOLT, K. **A Computer-Based Decision Support System for Vessel Fleet Scheduling - Experience and Future Research**. Decision Support Systems 37: 35–47, 2004.

FARAH, M. A. **Caracterização de Frações de Petróleo pela Viscosidade**. Tese de doutorado. Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

FURTADO, M. G. S. **O Problema de Roteamento e Programação de Navios com Coleta e Entrega na Indústria de Petróleo: Modelagem e Métodos de Solução Exatos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, 2016.

G1 — NORTE FLUMINENSE. **Petrobras Realiza Primeira Operação de Transbordo no Porto do Açu**. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/norte-fluminense/noticia/2019/05/27/petrobras-realiza-primeira-operacao-de-transbordo-no-porto-do-acu-em-sao-joao-da-barra-no-rj.ghtml>>. Acesso em: 30 jul. 2020.

GENDREAU, M., POTVIN, J. Y., BRAYSY, O., HASLE, G., & LØKKETANGEN, A. **Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem and its Extensions: a Categorized Bibliography**. In: The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. Golden, B., Raghavan, S., Wasil, E. (eds). Operations Research/Computer Science Interfaces, pgs. 143-169, 2008.

HENNIG, F., NYGREEN, B., FURMAN, K. C., SONG, J., KOCIS, G. R. **Crude Oil Tanker Routing and Scheduling**. Infor 49 (2): 153–170, 2011.

HOFF, A., ANDERSSON, H., CHRISTIANSEN, M., HASLE, G., LØKKETANGEN, A. **Industrial Aspects and Literature Survey: Fleet Composition and Routing**. Computers & Operations Research 37, 2041–2061, 2010.

HUSSAIN, R., ASSAVAPOKEE, T., KHUMAWALA, B. **Supply Chain Management in the Petroleum Industry: Challenges and Opportunities**. International Journal of Global Logistics & Supply Chain Management 1(2): 90-97, 2006.

IRNICH, S., TOTH, P., VIGO, D. **The Family of Vehicle Routing Problems**. In: Vehicle Routing Problems, Methods and Applications. Toth,

P., Vigo, D., (eds.), Society for Industrial and Applied Mathematics, 1–33, 2014.

KUMAR, S. N., PANNEERSELVAM, R. **A Survey on the Vehicle Routing Problem and its Variants**. Intelligent Information Management 4: 66–74, 2012.

OIL MONSTER. **Rio de Janeiro VLSFO max 0.5% Price**. 2020. Disponível em: <<https://www.oilmonster.com/bunker-fuel-prices/rio-de-janeiro-vlsfo-max-05-price/219/143>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

PETROBRAS- PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **Fact Sheet Plano Estratégico 2020-2024**. 2020. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/data/files/42/93/91/A3/F4E1F610231B6EE642563EA8/fact-sheet-plano-estrategico-2020-2024.pdf>>. Acesso em: 28 jul. 2020.

PETROBRAS - PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **Você sabe o que é um FPSO?** 2017. Disponível em: <<https://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/voce-sabe-o-que-e-um-fpso.htm>>. Acesso em: 29 jul. 2020.

PPSA - PRÉ-SAL PETRÓLEO S.A. **Results Estimate of Production Sharing Contracts**. 2019. Disponível em: <http://www.presalpetroleo.gov.br/ppsa/conteudo/ebook_12_12.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2020.

ROCHA, M. R. S. **Distribuição de Petróleo no Mercado Internacional – Um Instrumento de Suporte à Decisão Baseado em Estudo de Caso Prático**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

RODRIGUES, V. P. **Uma Abordagem de Otimização para a Roteirização e Programação de Navios: um Estudo de Caso na Indústria Petrolífera**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2014.

RODRIGUES, V. P., MORABITO, R., YAMASHITA D., SILVA, B. J. V. e RIBAS P. C. **Ship Routing with Pickup and Delivery for a Maritime Oil Transportation System: MIP Model and Heuristics**. *Systems* 4(3), 2016.

RONEN, D. **Cargo Ships Routing and Scheduling: Survey of Models and Problems**. *European Journal of Operational Research* 12: 119-126. 1983.

RONEN, D. **Ship Scheduling: The Last Decade**. *European Journal of Operational Research* 71: 325-333, 1993.

RONEN, D. **The Effect of Oil Price on Containership Speed and Fleet Size**. *Journal of the Operational Research Society* 62(1): 211–216, 2011.

ROPKE, S., CORDEAU, J. F., LAPORTE, G. **Models and Branch-and-Cut Algorithms for Pickup and Delivery Problems with Time Windows**. *Networks* 49(4): 258–272, 2007.

SAVELSBERGH., M. W. P., SOL, M. **The General Pickup and Delivery Problem**. *Transportation Science* 29(1):17-29, 1995.

TOTH, P. e VIGO, D. **An Overview of Vehicle Routing Problems**. In: "The Vehicle Routing Problem" Toth, P., Vigo, D., (eds.), *Siam Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, 1-26, 2002.

WILSON, N., SUSSMAN, J., WANG, H. e HIGONNET, B. **Scheduling Algorithms for Dial-a-Ride Systems**. *Urban Systems Laboratory Report USL TR-70-13*, MIT, Boston, 1971.