

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

JEANI DOS SANTOS DA SILVA DIAS

**PLANEJAMENTO DAS ROTAS DE NAVIOS ALIVIADORES PARA RETIRADA DE
ÓLEO PRODUZIDO DE PLATAFORMAS OFFSHORE DE PETRÓLEO
CONSIDERANDO MÚLTIPLOS COMPARTIMENTOS, MÚLTIPLOS PORTOS E
MÚLTIPLAS VIAGENS**

VITÓRIA
2021

JEANI DOS SANTOS DA SILVA DIAS

**PLANEJAMENTO DAS ROTAS DE NAVIOS ALIVIADORES PARA RETIRADA DE
ÓLEO PRODUZIDO DE PLATAFORMAS OFFSHORE DE PETRÓLEO
CONSIDERANDO MÚLTIPLOS COMPARTIMENTOS, MÚLTIPLOS PORTOS E
MÚLTIPLAS VIAGENS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA
2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

D541p Dias, Jeani dos Santos da Silva, 1987-
Planejamento das rotas de navios aliviadores para retirada de óleo produzido de plataformas offshore de petróleo considerando múltiplos compartimentos, múltiplos portos e múltiplas viagens / Jeani dos Santos da Silva Dias. - 2021.
84 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Alvarenga Rosa.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Logística. 2. Petróleo. 3. Logística naval. 4. Indústria petrolífera. I. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

JEANI DOS SANTOS DA SILVA DIAS

**PLANEJAMENTO DAS ROTAS DE NAVIOS ALIVIADORES PARA RETIRADA DE
ÓLEO PRODUZIDO DE PLATAFORMAS OFFSHORE DE PETRÓLEO
CONSIDERANDO MÚLTIPLOS COMPARTIMENTOS, MÚLTIPLOS PORTOS E
MÚLTIPLAS VIAGENS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em 22 de Março de 2021.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
Orientador

Prof. Dr. Elcio Cassimiro Alves
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
Membro Interno

Prof. Dr. Leandro Colombi Resendo
Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)
Membro Externo

VITÓRIA
2021

Dedico este trabalho aos meus pais Laurita e Oseias (em memória), que sempre me incentivaram aos estudos e me passaram os princípios do esforço e determinação.

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Jesus Cristo, meu salvador, por tudo. Por me dar orientação e direção quando surgem dúvidas na caminhada. Por me restaurar a saúde e por me permitir aproveitar a vida ao lado da minha família e amigos. Pela oportunidade de rever meu foco profissional ao retornar à universidade.

À minha família pelo apoio e incentivo, além da compreensão pelas minhas ausências. Especial agradecimento ao meu esposo, meu melhor amigo e com quem sempre compartilho primeiro minhas ideias.

Ao meu orientador, professor Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa, pelo incentivo, paciência e colaboração. Aos colegas do laboratório de Modelagem Matemática e Meta-heurísticas aplicadas à Engenharia de Produção – LAMMEP por toda a ajuda. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelo acolhimento, ensinamento e reflexão. E aos funcionários da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES por colaborarem para manter um ensino de qualidade e gratuito.

“Não nos cansemos de fazer o bem. Pois, se não desanimarmos, chegará o tempo certo em que faremos a colheita. ”

(Bíblia Sagrada, Gálatas capítulo 6, versículo 9)

RESUMO

O petróleo frequentemente é produzido em lugares distantes de onde será refinado e distribuído. No Brasil, a maior parte da produção de petróleo ocorre no mar onde o óleo é armazenado em plataformas até o momento de sua movimentação para os portos. Como a capacidade dos tanques de armazenamento de petróleo de cada plataforma é limitada, é necessária a adoção de alguma metodologia para retirada do volume produzido de forma a manter a produção contínua. O recolhimento do petróleo produzido por navios é uma dessas metodologias e envolve diversas restrições operacionais. Dentre as restrições podemos citar o tipo de navio que pode atracar em cada plataforma e em cada porto, as capacidades de transporte de cada navio, a necessidade de manter diferentes tipos de petróleo separados no navio, e o momento inicial e final para começar a retirada de petróleo em cada solicitação de retirada de petróleo da plataforma para que ela não tenha que parar a produção caso essa capacidade seja toda ocupada. A decisão de quais navios farão o recolhimento dos diferentes tipos de óleos produzidos por cada plataforma, em qual sequência e em quais portos os navios farão a entrega do petróleo, de uma série de portos disponíveis, tornam o roteamento difícil. Para realizar esse planejamento, é proposto um novo modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista considerando várias viagens, múltiplos portos, múltiplos porões e as restrições citadas com o objetivo de reduzir o custo de transporte. Foram criadas 33 instâncias baseadas na maior empresa brasileira de exploração e produção de petróleo. Utilizou-se o CPLEX 12.10 para resolver o modelo e os resultados mostraram que foram obtidas reduções do custo total de até 17,8% e diminuição na distância total percorrida pelos navios de até 13,3%. O método proposto mostrou-se aplicável ao planejamento de viagens para atender às requisições de atendimento das plataformas, como também uma ferramenta para apoiar decisões.

Palavras-chave: Logística do petróleo. Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos. Roteamento de Veículos com Múltiplos Compartimentos. Roteirização de Veículos com Múltiplas rotas.

ABSTRACT

Oil is often produced in locations far from where it will be refined and distributed. In Brazil, most of the oil production occurs in the sea where the oil is stored on platforms until the moment of its transfer to the ports. As the capacity of the oil storage tanks on each platform is limited, it is necessary to adopt some methodology to remove the volume produced to maintain continuous production. The collection of oil produced by ships is one of these methodologies and involves several operational restrictions. Among the restrictions we can mention the type of ship that can dock at each platform and port, the transport capacities of each ship, the need to keep different types of oil separate on the ship, and the initial and final moment to start the withdrawal of oil in each request to remove oil from the platform so that it does not have to stop production if this capacity is fully occupied. The decision of which ships will collect the different types of oils produced by each platform, in which sequence and in which ports the ships will deliver oil, from a series of available ports, make routing difficult. To carry out this planning, a new mathematical model is proposed considering several trips, multiple ports, multiple holds, and the restrictions mentioned to reduce the cost of transportation. 33 instances were created based on the largest Brazilian oil exploration and production company. CPLEX 12.10 was used to solve the model and the reduction in the total cost was up to 17.8% and the decrease in the total distance traveled by the ships was up to 13.3%. The proposed method proved to be applicable to travel planning to meet the service requests of the platforms, as well as a tool to support strategic decisions.

Keywords: Oil Logistics. Multi Depot Vehicle Routing Problem. Multi Compartment Vehicle Routing Problem. Vehicle Routing Problem with Multiple Routes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo produtivo de petróleo no mar.....	14
Figura 2: Operação de offloading ou alívio de plataforma.....	15
Figura 3: Algumas plataformas de petróleo instaladas no Brasil.....	16
Figura 4: Representação de um MDVRP com dois depósitos.....	26
Figura 5: Esquema de um exemplo MCVRP.....	27
Figura 6: Representação da janela de tempo.....	40
Figura 7: Exemplo de programação de viagens.....	41
Figura 8: Representação esquemática dos conjuntos PR, NT, PV, PVT, PRT e PTP ..	45
Figura 9: Capacidade dos navios utilizados na Instância 1.....	62
Figura 10: Resultado gráfico do Navio 2 da Instância 1.....	63
Figura 11: Custo ao variar a quantidade de porões considerando as Instâncias 1, 4 e 5.....	67
Figura 12: Custo ao variar a quantidade de porões considerando as Instâncias 2, 6 e 7.....	68
Figura 13: Custo ao variar a quantidade de porões considerando as Instâncias 3, 8 e 9.....	68
Figura 14: Variação do custo ao ter apenas um porto disponível considerando as Instâncias 1, 10 e 11.....	69
Figura 15: Variação do custo ao ter apenas um porto disponível considerando as Instâncias 2, 12 e 13.....	70
Figura 16: Custo ao reduzir a quantidade de produtos considerando as Instâncias 1, 14 e 15.....	71
Figura 17: Custo ao reduzir a quantidade de produtos considerando as Instâncias 2, 16 e 17.....	71
Figura 18: Variação de custo ao retirar as restrições de acesso de navios às plataformas considerando as Instâncias 1, 18, 19 e 20.....	72
Figura 19: Variação de custo ao retirar as restrições de acesso de navios às plataformas considerando as Instâncias 2, 21 e 22.....	73
Figura 20: Variação de custo ao incluir as restrições de acesso de navios aos portos das considerando as Instâncias 1, 23 e 24.....	74

Figura 21:Variação de custo ao incluir as restrições de acesso de navios aos portos considerando as Instâncias 2, 25 e 26	75
Figura 22: Variação de custo ao alterar a restrição de acesso por limitação de carga a bordo do navio considerando as Instâncias 1, 27, 28 e 29	76
Figura 23: Variação de custo ao alterar a restrição de acesso por limitação de carga a bordo do navio considerando as Instâncias 2, 30, 31 e 32	76
Figura 24: Variação de custo ao alterar a restrição de acesso por limitação de carga a bordo do navio considerando as Instâncias 3 e 33	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo Dos Artigos Publicados Sobre Veículos Com Múltiplos Compartimentos e múltiplos depósitos.....	37
Tabela 2: Posicionamento georreferencial para as plataformas e para os portos.....	55
Tabela 3: Características das instâncias.....	56
Tabela 4: Resultados obtidos pelo CPLEX para as instâncias.....	61
Tabela 5: Viagens geradas na Instância 1	62
Tabela 6: Viagens geradas na Instância 2	64
Tabela 7: Viagens geradas na Instância 3	64
Tabela 8: Análises dos resultados operacionais mais relevantes	66

LISTA DE SIGLAS

ACS – *Algoritmo Ant Colony System*

ALNS – *Adaptive Large Neighborhood Search*

ANP – *Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*

CMDVRPTWA – *Collaborative Multi-Depot Vehicle Routing Problem With Time Window Assignment*

CVRP – *Capacitated Vehicle Routing Problem*

GA – *Genetic Algorithms*

GQP – *Game Quadratic Programming*

GRASP – *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*

HFVRP – *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem*

HGA – *Hybrid Genetic Algorithm*

HPSO – *Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm*

ILS – *Iterated Local Search*

MCVRP – *Multi-Compartment Vehicle Routing Problem*

MDVRP – *Multi-Depot Vehicle Routing Problem*

MILP – *Mixed Integer Linear Programming*

MTVRP – *Multi-Trip Vehicle Routing Problem*

PDPTW – *Pick-up and Delivery Problem with time windows*

SA – *Simulated Annealing*

SDVRP – *Site Dependent Vehicle Routing Problem*

VRP – *Vehicle Routing Problem*

VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*

TSP – *Travelling Salesman Problem*

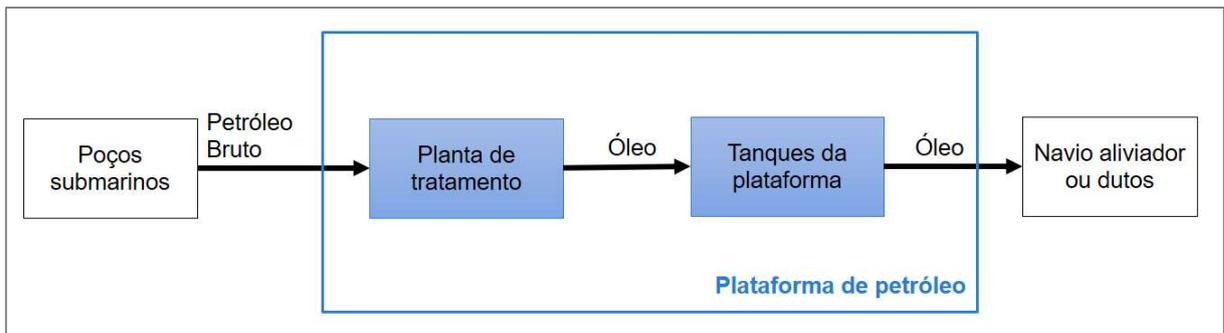
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	OBJETIVO GERAL.....	17
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1	PLANEJAMENTO DE ROTAS DE NAVIOS PARA ATENDIMENTO A PLATAFORMAS OFFSHORE	20
2.2	PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS.....	23
2.2.1	MÚLTIPLOS DEPÓSITOS.....	27
2.2.2	MÚLTIPLOS COMPARTIMENTOS.....	31
2.2.3	RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM MÚLTIPLOS COMPARTIMENTOS E MÚLTIPLOS DEPÓSITOS.....	35
3	PROBLEMA ESTUDADO.....	39
4	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO.....	43
5	GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS.....	54
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	60
7	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

O petróleo frequentemente é produzido em lugares distantes de onde será refinado e consumido. No Brasil, em 2018, dos 150 milhões de m³ produzidos de petróleo, 95,7 % foram produzidos no mar (ANP, 2019). A produção de petróleo típica no mar envolve a elevação do petróleo oriundo dos poços submarinos e a chegada dos fluídos na plataforma, onde óleo é armazenado em tanques. A Figura 1 apresenta um esquema sobre o processo produtivo de petróleo no mar. A capacidade dos tanques de óleo de cada plataforma é limitada, sendo necessária a adoção de alguma metodologia para retirada do volume produzido.

Figura 1: Processo produtivo de petróleo no mar



Para realizar o transporte de petróleo produzido em plataformas marítimas é possível utilizar, normalmente, dois sistemas de transporte: 1) rede de dutos submarinos instalados no leito marinho e 2) navios aliviadores (PUCU, 2011). A operação por rede de dutos envolve grandes investimentos em infraestrutura, com grande impacto econômico e ambiental, além de apresentar dificuldades para aumento da capacidade de transporte. Na operação via navios aliviadores, o óleo produzido é recolhido das plataformas por grandes navios petroleiros e depois é descarregado nos portos. Essa metodologia de retirada de óleo apresenta maior flexibilidade pois o porto de envio de óleo pode ser selecionado de acordo com a programação do navio escolhido ou outro critério da equipe de planejamento. Esse estudo pretende planejar rotas otimizadas de navios para retirada de óleo produzido de plataformas *offshore* (marítimas) de petróleo considerando múltiplos porões dos navios, múltiplos portos e múltiplas viagens. A Figura 2 mostra um processo de alívio ou de *offloading* de uma plataforma produtora, isso é, a retirada de petróleo dos tanques da plataforma.

Figura 2: Operação de *offloading* ou alívio de plataforma



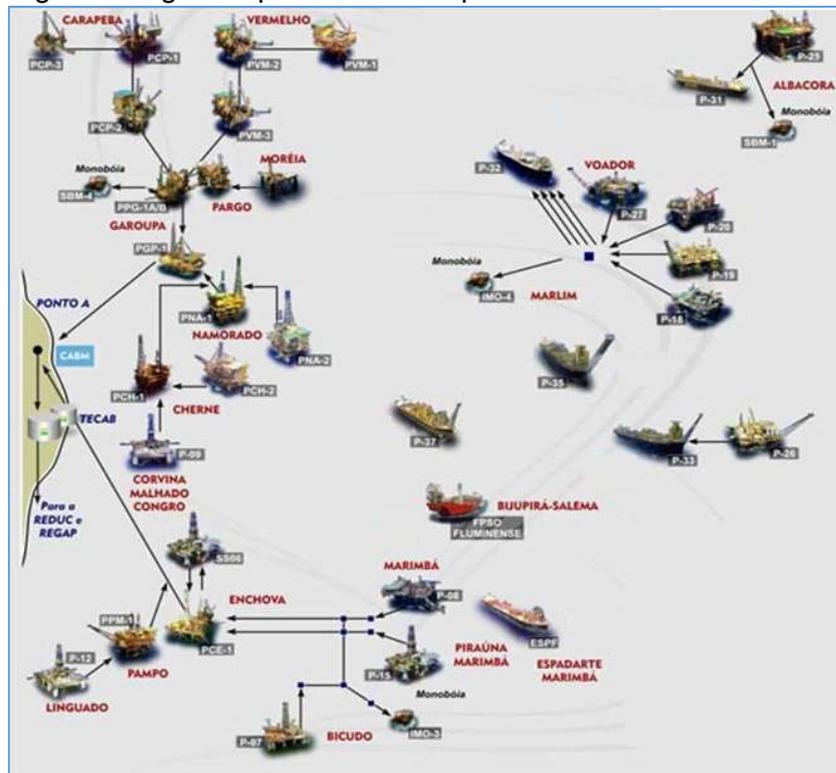
Fonte: Rosengren (2006).

A produção de petróleo, na área do pré-sal na costa brasileira, passou de 500 mil barris por dia, em 2014, para o patamar de 1,5 milhão de barris por dia em 2018 (PETROBRAS, 2019). Esse crescimento aumentou a preocupação com a complexa logística de retirada de petróleo das plataformas, tendo em vista a crescente necessidade de frota para a movimentação de petróleo.

Para elaborar as viagens dos navios que irão fazer a retirada do petróleo das plataformas, uma equipe de planejamento de uma empresa de exploração e produção de petróleo, a cada mês, recebe as requisições de retirada de líquido de cada instalação. As requisições de retirada de óleo das plataformas apresentam os períodos de disponibilidade de descarga, de forma que continuem com espaço disponível nos tanques para produzir, considerando também os períodos que a retirada de petróleo não pode ocorrer por demandas de manutenção das plataformas. Cada requisição precisa ocorrer dentro de uma janela de tempo, cada requisição é limitada por uma data e hora inicial e uma data e hora final. De posse das requisições, a equipe de apoio logístico elabora o planejamento das viagens dos navios que devem atender a todas as requisições dos períodos informados, minimizando o custo total dos alívios e respeitando a capacidade de carga do navio.

As viagens dos navios devem atender algumas premissas. A quantidade de óleo solicitada na requisição deve ser retirada em uma única visita à plataforma e a janela de tempo de cada requisição precisa ser atendida. Os navios utilizados são de diferentes tipos em termos de custo e capacidade e possuem múltiplos compartimentos para armazenagem de petróleo, sendo que alguns tipos de navio não podem atender todas as instalações. Existem diferentes tipos de petróleo e alguns precisam ser separados no navio. O momento inicial e final para começar a retirada de petróleo da plataforma precisa ser respeitado, de forma que a instalação não tenha que parar a produção caso sua capacidade seja toda ocupada. Esta dissertação trata particularmente nas plataformas no Brasil, conforme Figura 3.

Figura 3: Algumas plataformas de petróleo instaladas no Brasil



Fonte: Somos online (2017).

Não foi encontrado, na literatura pesquisada, nenhum modelo matemático que incorporasse todas essas restrições em um único modelo, que fosse aplicado ao setor de petróleo e gás e se relacionasse com o planejamento de rotas para atendimento às programações de retirada de petróleo das plataformas.

Assim, esta dissertação propõe um modelo matemático usando Programação Linear Inteira Mista para a elaboração de rotas para atendimento das requisições de alívio das plataformas de petróleo, integrando conceitos dos modelos matemáticos de roteamento de veículos *Multi-Compartment Vehicle Routing Problem* (MCVRP), *Multi-Trip Vehicle Routing Problem* (MTVRP), *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP), *Site Dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP), *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) e *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* (HFVRP). As informações utilizadas no estudo são baseadas em dados reais de uma empresa de petróleo que atua na costa marítima do Brasil e o modelo matemático proposto será testado com diversas instancias.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 *Objetivo Geral*

Elaborar um modelo matemático para planejamento das rotas de navios aliviadores que retiram óleo produzido de plataformas *offshore* de petróleo considerando múltiplos compartimentos, múltiplos portos e múltiplas viagens, visando a redução nos custos de transporte.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos dessa dissertação são:

- Aplicar o modelo matemático à programação de retirada de petróleo de plataformas armazenadoras de petróleo de uma empresa produtora de petróleo que atua no Brasil;
- Analisar as viagens geradas pelo modelo matemático em diversas instâncias.

1.2 JUSTIFICATIVA

Na cadeia de suprimento de petróleo a etapa de transporte de óleo cru envolve altos custos e riscos não desprezíveis na movimentação do produto. Parte significativa do custo operacional de produção de petróleo é devido ao seu transporte (PUCU, 2011). Nesse contexto, surge a necessidade de desenvolver um modelo matemático capaz de lidar com a complexidade de elaborar e planejar viagens para os navios aliviadores. O modelo matemático desenvolvido por este trabalho poderá aumentar a eficiência e eficácia das operações portuárias, trazer maior assertividade no atendimento às janelas de tempo disponibilizadas pelas plataformas *offshore* e poderá aumentar a capacidade do tomador de decisão.

Além da motivação prática do desenvolvimento desse projeto, problemas de roteirização com múltiplos depósitos e múltiplos compartimentos permanecem pouco explorados. A presente pesquisa procura suprir essa lacuna existente na literatura, elaborando formulações mais próximas das aplicações reais.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além do presente capítulo, de caráter introdutório, esta dissertação traz mais outros sete capítulos.

O segundo capítulo apresenta o referencial teórico. É abordado o planejamento de viagens para transporte marítimo de petróleo e conceitos de roteamento de veículos relevantes ao tema da dissertação. Também há uma revisão bibliográfica sobre o MCVRP e sobre o MDVRP.

O terceiro capítulo expõe o problema estudado descrevendo o modelo de escoamento de petróleo por navios. São relatadas algumas especificidades do problema que o diferenciam do problema tradicional de MCVRP ou de MDVRP.

O quarto capítulo descreve o modelo matemático. São apresentadas as restrições que

representam o problema apresentado no capítulo anterior.

O quinto capítulo faz referência ao levantamento de dados e à geração de instâncias; no sexto capítulo apresentam-se os resultados obtido e as análises.

No sétimo capítulo constam as conclusões do trabalho e aponta também perspectivas de pesquisa futura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo aborda-se o planejamento de viagens para transporte marítimo de petróleo e os modelos matemáticos de roteamento de veículos que podem ser considerados para atender a operação de plataformas *offshore*. São destacados os problemas com múltiplos depósitos e múltiplos compartimentos.

2.1 PLANEJAMENTO DE ROTAS DE NAVIOS PARA ATENDIMENTO A PLATAFORMAS OFFSHORE

O transporte marítimo de carga é extremamente relevante pelo seu baixo custo e eficiência, além de ter uma abrangência territorial enorme, visto que o nosso planeta conta com 70% da sua superfície coberta por mares. Christiansen *et al.* (2013) afirmaram em uma revisão sobre problemas de roteamento e programação de navios que a quantidade de estudos sobre o assunto tem crescido nos últimos anos. A roteirização mal planejada pode levar ao aumento de emissões atmosféricas devido ao consumo de combustível de forma ineficiente, a atrasos nos prazos de entrega, a indisponibilidade de navios, dentre outros problemas. Para o petróleo ainda existe o risco de derramamento de produtos perigosos no meio ambiente durante o transporte.

Iakovou (2001) desenvolveu um modelo estratégico de fluxo de rede para o transporte marítimo de produtos petrolíferos considerando riscos de acidentes e planejamento de rotas. Foram considerados os tipos de mercadorias transportadas, a oferta e a demanda conhecida de cada porto, os tipos de navios de transporte, a quantidade transportada e o custo de transporte por trecho e por tipo de embarcação. O custo do risco esperado para o transporte de uma unidade de volume também foi estimado considerando o histórico de derramamentos e o custo dos danos infligidos por cada derramamento histórico. O modelo de otimização marítima desenvolvido foi testado com dados do Golfo do México e várias soluções foram geradas pela escolha de diferentes pesos para refletir as várias compensações entre os custos de transporte e risco para cada arco na rede, permitindo a escolha de uma solução que melhor refletisse essas compensações.

Siddiqui e Verma (2015) apresentaram uma programação de otimização com o objetivo de minimizar custo operacional e risco de transporte, visando planejar rotas e cronogramas para uma frota heterogênea de petroleiros. O modelo matemático proposto foi testado em várias instâncias usando informações públicas disponíveis de um dos maiores produtores e fornecedores de petróleo do mundo. Uma das conclusões do trabalho foi que embarcações maiores devem ser usadas se o fator risco for mais importante que o custo.

Aizemberg *et al.* (2014) trataram de outro problema relacionado aos estoques para o transporte marítimo de petróleo. As plataformas e os terminais deveriam manter os níveis de inventário entre um limite inferior e um superior para evitar a falta ou excesso de produto. Para isso, desenvolveram uma formulação, onde o nível de estoque de cada dia em cada local é representado por uma variável contínua e as remessas são representadas por variáveis binárias.

Hennig *et al.* (2015) consideraram o problema de roteamento e programação de navios de diferentes tipos de petróleo bruto do Oriente Médio para a América do Norte, para Europa e para a região Ásia e Pacífico. O problema pode ser considerado como de roteamento e programação de navios petroleiros com coleta e entrega parceladas, já que as quantidades de coleta e entrega podem ser divididas arbitrariamente entre os navios da frota. Para resolução, os autores estudaram o desempenho de duas formulações matemáticas, um modelo que utiliza quantidades de carga de forma discreta e um modelo que trata as quantidades de carga de forma contínua, sendo que os resultados da otimização do modelo de carga contínua foram um pouco melhores.

Na literatura foram publicados, nos últimos anos, alguns estudos sobre planejamento de rotas de navios que transportam petróleo bruto produzido de plataformas *offshore* brasileiras. Rodrigues *et al.* (2016) desenvolveram um modelo com o objetivo de minimizar os custos de combustível de uma frota heterogênea de navios petroleiros e os custos relacionados a contratos de frete de uma empresa petrolífera que opera no litoral brasileiro. Um problema de coleta e entrega com janelas de tempo, com frota

heterogênea, vários depósitos (localizações inicial e final de cada navio) e várias visitas em cada plataforma no horizonte de planejamento foi resolvido utilizando heurísticas customizadas baseadas em heurísticas *relax-and-fix*. Rodrigues *et al.* (2017) ampliaram o estudo de Rodrigues *et al.* (2016), aprimorando a heurística desenvolvida.

Furtado, Munari e Morabito (2017) desenvolveram um modelo de programação inteira mista aprimorando o trabalho de Rodrigues *et al.* (2016). Eles propuseram dois métodos de solução exatos do tipo *branch-and-cut* que considerava ainda impossibilidade de atracação, calado flexível (calado é a parte do navio que fica submersa na água), existência ou não de tecnologia de posicionamento dinâmico e penalização por visitas consecutivas na mesma plataforma.

Stanzani *et al.* (2018) também estenderam o problema de Rodrigues *et al.* (2016). Eles trataram do problema de roteamento e agendamento multiponto com restrições nos níveis de estoque. Para lidar com instâncias de problemas maiores, propuseram uma abordagem matemática combinando uma heurística com várias etapas e um procedimento de busca local.

Diversos autores estudaram também o suprimento de plataformas de produção de petróleo. Arpini e Rosa (2015) realizaram o planejamento da logística de suprimento de plataformas considerando o equilíbrio náutico e a melhor arrumação das cargas no convés. O modelo proposto se diferenciava por considerar uma frota de diferentes tipos de navios e utilizar uma função objetivo que visa minimizar o número de navios, a distância percorrida, e a diferença entre os pesos distribuídos entre os bordos do navio.

Astoures, Rosa e Silva Rosa (2016) desenvolveram um modelo matemático baseado no problema de roteamento de veículos com instalações intermediárias de reabastecimento para resolver o problema de fornecer diesel às plataformas. O artigo tratou de uma aplicação real de uma grande petroleira brasileira. Dentre as instâncias analisadas a que mostrou o melhor resultado foi a que considerou a estratégia de aumentar o turno de tripulação.

Cuesta *et al.* (2017) trataram do Problema de Roteamento de Navios com Capturas e Entregas Seleccionadas para planejar viagens regulares e viagens expressas, quando necessário. Eles também propuseram um modelo de seleção de pedidos para a viagem regular com rota fixa.

Pinto *et al.* (2018) planejaram viagens para abastecer plataformas offshore, considerando a disposição das cargas no convés do navio e o equilíbrio do navio em relação à quilha. Eles buscavam minimizar os custos de afretamento de navios, reduzindo o número de navios usados e a distância percorrida. Eles propuseram uma nova heurística e foram resolvidas instâncias reais com até 30 plataformas e até 240 cargas.

Pinto *et al.* (2019) buscavam a definição da frota de barcos necessária e de um plano de viagens dos navios visando o atendimento às demandas de suprimento das plataformas ao menor custo. Eles apresentaram uma abordagem baseada no Problema de Roteirização de Veículos Periódico. A validação do modelo matemático proposto foi realizada a partir da construção de 18 instâncias de testes com dados reais da Bacia Potiguar.

2.2 PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

O problema de roteirização de veículos ou *Vehicle Routing Problem* (VRP) é um nome genérico referente a uma classe de problemas de otimização combinatória em que vários veículos atendem aos clientes. Proposto na literatura inicialmente por Dantzig e Ramser (1959), o VRP consiste em encontrar um conjunto de rotas para veículos idênticos com base nos depósitos, de modo que cada um dos clientes seja visitado exatamente uma vez, minimizando o custo total de roteamento (CHEN; YANG, 2017). Do ponto de vista da complexidade, o VRP clássico é conhecido por NP-hard, pois generaliza o problema do caixeiro-viajante (TSP – *Traveling Salesman Problem*) que é um problema bem conhecido de NP-hard (MONTROYA-TORRES *et al.*, 2015).

Braekers, Ramaekers e Nieuwenhuys (2016) explicaram que o *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) projeta rotas de entrega ideais onde cada veículo viaja apenas em uma rota, os veículos têm as mesmas características e existe apenas um depósito central. Seu objetivo é encontrar um conjunto de rotas de veículos de menor custo, de modo que cada cliente seja visitado exatamente uma vez por um veículo, cada veículo inicia e termina sua rota no depósito e a capacidade dos veículos não é excedida. Esse VRP clássico foi estendido de várias maneiras pela introdução de aspectos ou características adicionais da vida real, resultando em um grande número de variantes do VRP.

De acordo com Belfiore e Yoshizaki (2009), o *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* (HFVRP) tem o objetivo de minimizar a soma dos custos fixos do veículo e dos custos variáveis de roteamento. Os custos com veículos eram os custos totais de aquisição e manutenção de uma frota heterogênea. Os custos de roteamento eram relacionados à distância total percorrida.

Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) é uma particularização do VRP que pressupõe que as entregas a um determinado cliente devem ocorrer em um determinado intervalo de tempo, que varia de cliente para cliente. De acordo com Canhong *et al.* (2014), a literatura apresenta, três tipos de janelas de tempo: *Hard Time Window*, *Soft Time Window* e *Semi Soft Time Windows*.

O *Hard Time Window* considera que um veículo deve chegar e estar pronto para atender o cliente antes ou logo antes do intervalo de tempo especificado, a chegada tardia não é permitida e se o veículo chegar antes da janela do tempo ele terá que esperar. No *Soft Time Window* a violação da restrição da janela de tempo é aceitável ao preço de alguma penalidade. Já o *Semi Soft Time Windows* refere-se ao cenário em que a chegada antecipada é permitida sem nenhum custo, enquanto a chegada tardia incorre em um custo de multa.

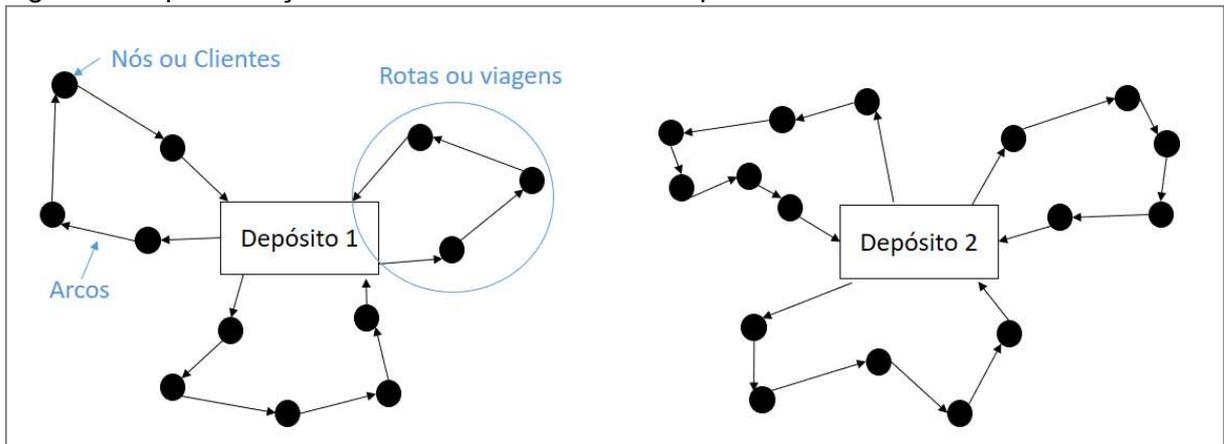
O *Multi-Trip Vehicle Routing Problem* (MTVRP) permite que cada veículo dentro do horizonte de planejamento pudesse realizar mais de uma viagem (Cattaruzza *et al.*,

2018). Ao realizar várias viagens de uma frota de veículos heterogêneos é possível aumentar a utilização de veículos menores (Cattaruzza *et al.*, 2016).

O *Site Dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP) considera que existem diferentes tipos de veículos e que cada cliente precisa de um tipo especial de veículo para ser atendido (Zare-Reisabadi e Mirmohammadi, 2015). Zare-Reisabadi e Mirmohammadi (2015) apresentaram também alguns exemplos práticos de restrições de acesso de veículos: áreas da cidade em que apenas veículos com autorização especial podem acessar, restrições de tráfego para diminuir poluição do ar ou poluição sonora, veículos maiores impedidos de acessar bairros com pequenas vielas ou pontes com restrição de carga e clientes que requerem veículos com equipamentos especiais para carga ou descarga.

O *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP), segundo Renaud, Laporte e Boctor (1996), consiste em construir um conjunto de rotas de veículos de forma em que cada rota comece e termine no mesmo depósito, cada cliente seja visitado exatamente uma vez por um veículo, a demanda total de cada rota não excede a capacidade do veículo, a duração total de cada rota (incluindo tempo de viagem e serviço) não excede um limite predefinido e o custo total da rota seja minimizado. Montoya-Torres *et al.* (2015) acrescentaram que o MDVRP considera que os clientes não estão agrupados em torno de cada depósito e poderiam ser atendidos a partir de qualquer um dos depósitos usando a frota de veículos disponível. A Figura 4 representa um problema de roteamento de veículos em que mais de um depósito é considerado.

Figura 4: Representação de um MDVRP com dois depósitos

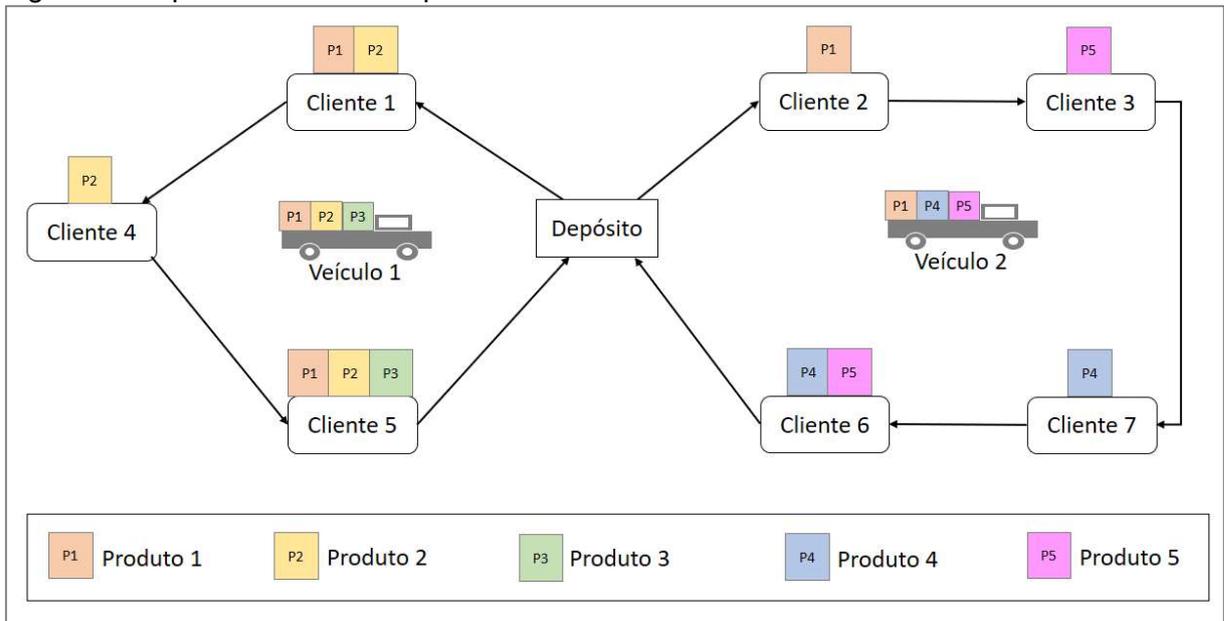


Fonte: Adaptado de Montoya-Torres *et al.* (2015)

O *Multi-Compartment Vehicle Routing Problem* (MCVRP) considera que diferentes produtos são transportados em compartimentos diferentes no mesmo veículo. Essa necessidade ocorre quando produtos diferentes não podem ser misturados devido a diferenças em suas características individuais (Abdulkader *et al.*, 2015). De acordo com Fallahi, Prins e Calvo (2008), o MCVRP é definido em uma rede não direcionada, incluindo um depósito e um conjunto de clientes. O depósito armazena diversos produtos que devem ser entregues aos clientes por uma frota de veículos idênticos com um ou mais compartimentos de capacidade limitada. Cada compartimento é reservado para um produto específico e cada cliente solicita quantidades conhecidas de um ou mais produtos. O MCVRP consiste em determinar um conjunto de rotas que atenda a todas as solicitações a um custo mínimo.

A Figura 5 apresenta um exemplo de MCVRP com um depósito que atende sete clientes com cinco produtos, P1, P2, P3, P4 e P5, em dois veículos com três compartimentos cada. A partir do depósito, o veículo 1 sai com os produtos P1, P2 e P3 e entrega os produtos P1 e P2 ao cliente 1, depois entrega o produto P2 ao cliente 4, entrega os produtos P1, P2 e P3 ao cliente 5, retornando em seguida ao depósito. Da mesma forma, o outro veículo começa no depósito e sai para entregar os produtos P1, P4 e P5. Ele entrega o produto P1 ao cliente 2, depois entrega o produto P5 ao cliente 3, entrega o produto P4 ao cliente 7, entrega os produtos P4 e P5 ao cliente 6 e, em seguida, retorna ao depósito.

Figura 5: Esquema de um exemplo MCVRP



A partir deste ponto, será realizada uma revisão bibliográfica dos principais artigos publicados nos últimos anos sobre Problemas de Roteirização de Veículos com Múltiplos Compartimentos e com Múltiplos Depósitos.

2.2.1 Múltiplos depósitos

Ramos *et al.* (2014) modelaram um problema de roteamento de veículos com vários produtos e vários depósitos com os objetivos de minimizar a distância percorrida e minimizar também as emissões de gás carbônico, esse último como uma função da energia consumida. O estudo foi motivado por um sistema real de coleta de resíduos de embalagens recicláveis em operação em Portugal. Foi formulada uma programação linear inteira mista (MILP) e uma heurística foi proposto para superar a carga computacional observada ao lidar com problemas de larga escala.

Karakatič e Podgorelec (2015) revisaram o uso de algoritmos genéticos (GA) no MDVRP. Foi desenvolvido um protótipo funcional de GA para resolver o MDVRP, comparando alguns operadores mais usados e verificando quais deles são mais adequados para o problema. As soluções baseadas no GA também foram comparadas com outras soluções existentes, exatas e heurísticas. Como resultado do

experimento foi percebido quais abordagens deram bons resultados e deveriam ser utilizadas em qualquer outro estudo feito com o mesmo tipo de problema em mente. Além disso, concluíram que GAs eram muito apropriados para esse tipo de solução de problemas.

Allahyari, Salari e Vigo (2015) propuseram um problema de roteamento de veículos com vários depósitos que não obriga a visitação de todos os clientes, em vez disso, um cliente poderia ser atendido quando estava localizado a uma distância aceitável de um cliente visitado. Um exemplo desse problema é a distribuição de bens para pessoas afetadas por desastres ambientais, quando por limitação de recursos ou de tempo não é possível visitar todas as áreas afetadas. Para o problema foram desenvolvidas duas formulações de programação inteira mista e uma meta-heurística híbrida combinando o *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP), *Iterated Local Search* (ILS) e *Simulated Annealing* (SA). Após testes computacionais a técnica desenvolvida se mostrou efetiva.

Wang *et al.* (2016) estudaram o problema de roteamento de veículos com vários depósitos com serviços que poderiam ser divididos entre os veículos, deste que cada um atendesse um tempo de serviço mínimo. Eles desenvolveram um procedimento heurístico de três estágios onde apenas na terceira etapa era aplicado um pós-processador para garantir que o requisito de tempo mínimo de serviço seria atendido. Assim, conseguiram melhoras em consideração ao procedimento existente.

Calvet *et al.* (2016) consideraram uma versão do MDVRP em que os depósitos eram heterogêneos em oferta comercial e os clientes mostravam uma disposição diferente de consumir, dependendo de como o depósito atribuído se encaixava em suas preferências. O objetivo seria maximizar os benefícios esperados e a receita esperada de vendas menos os custos de distribuição. Para resolver o problema, foi desenvolvida uma abordagem que combina técnicas de aprendizado estatístico, para estimar a demanda de qualquer cliente considerando o depósito designado, com uma heurística.

Chen e Yang (2017), considerando as interações entre caminhões de entrega e outros veículos diretamente, desenvolveram um modelo matemático para resolver um problema de agrupar clientes, estimar tráfego Origem/Destino e atribuir tráfego. Eles usaram uma programação de duas partes para modelar o problema. A primeira parte determina os clientes que cada caminhão visita e adiciona as viagens dos caminhões para as viagens iniciais. Já a segunda parte atribui as viagens à rede rodoviária. O modelo foi aplicado utilizando dados reais da cidade de Dalian (China) e como resultado o modelo forneceu um tempo menor de entrega e também ajudou a evitar congestionamentos em vias saturadas.

Du *et al.* (2017) também desenvolveram um modelo de programação de duas partes. Os autores buscavam minimizar o risco total esperado de transporte ao entregar materiais perigosos a clientes a partir de vários depósitos. A primeira parte alocava os clientes para os depósitos sob as restrições de capacidade e demanda do cliente, enquanto a segunda parte determinava o caminho ideal para cada grupo de depósitos e clientes. Algoritmos heurísticos de otimização foram desenvolvidos para resolver o problema baseados em simulação difusa (HPSO), algoritmo genético (GA), algoritmo de colônia de formiga e em algoritmo de recozimento simulado (SA). Ao comparar o desempenho desses algoritmos heurísticos, verificaram que o HPSO apresentava melhor desempenho em termos de otimização, enquanto o algoritmo de colônia de formigas precisava de menor tempo de computação.

Paz, Granada-Echeverri e Escobar (2018) apresentaram o problema de roteamento de localização de veículos elétricos com vários depósitos com janelas de tempo considerando a disponibilidade de duas tecnologias de suprimento de energia: a tecnologia de carga convencional e as estações de troca de bateria. A existência de diferentes tipos de estratégia de recarga implicou no desenvolvimento de três modelos de programação linear inteira mista: um para cada uma das tecnologias mencionadas acima e outro no qual as duas opções são levadas em consideração. Os resultados mostraram que os custos de instalação e os custos da operação da rede logística impactam significativamente nas decisões de projeto com veículos elétricos.

Bertazzi *et al.* (2019) resolveram um problema de roteamento que buscava atender clientes de diferentes depósitos, gerenciando seus níveis de estoque para evitar falta de produto. Os clientes foram agrupados em grupos baseados no nível de estoque crítico do cliente e o problema foi formulado como um modelo de programação linear inteira mista. Ao comparar a solução desenvolvida com um algoritmo *branch-and-cut* e aplica-la em um grupo de pequenos varejistas independentes (*nanostores*) a modelagem se mostrou eficaz.

Li J., Li Y. e Pardalos (2016) apresentaram uma variação do problema de roteamento de veículos com janelas de tempo onde o depósito onde o veículo termina é flexível, o que pode reduzir o custo total da viagem. O modelo de transporte melhora a flexibilidade da operação já que os veículos podem terminar no depósito mais próximo do último cliente. Um modelo de programação inteiro é formulado sob as restrições de duração da rota do veículo, o tamanho da frota e o número de vagas em cada depósito. Foi proposto um algoritmo genético híbrido com busca local adaptativa para resolver o problema e os resultados computacionais mostraram que o método proposto reduziu o custo total da viagem em cerca de 2%.

Wang *et al.* (2020) apresentaram um problema de roteamento colaborativo de veículos com vários depósitos com atribuição de janela de tempo (*Collaborative Multi-Depot Vehicle Routing Problem With Time Window Assignment - CMDVRPTWA*). Foi estabelecido um modelo de otimização com base no custo operacional total e no número de veículos utilizados. Um algoritmo híbrido que utilizava a heurística de Clarke e Wright e algoritmo genético foi criado para resolver o problema. O modelo foi aplicado em um estudo de caso na cidade de Chongqing, China, e resultou em economia de custos na rede de distribuição. O lucro gerado pela otimização da rede de distribuição foi alocado pelo método *Game Quadratic Programming* (GQP).

Zhen *et al.* (2020) apresentaram um problema de roteamento de veículo com várias estações, vários depósitos, com janelas de tempo e com datas de lançamento para representar a entrega de pacotes comprados online de vários centros de distribuição para vários clientes. A data de lançamento é a hora em que o pacote solicitado por um cliente no centro de distribuição pode ser entregue por um veículo. Para resolver

o problema foi formulado inicialmente um modelo de programação inteira mista e em seguida foi desenvolvido um algoritmo híbrido de otimização de enxame de partículas (HPSO) e um algoritmo genético híbrido (HGA). Foi demonstrado que as duas meta-heurísticas propostas tinham capacidades semelhantes de execução, mas o HGA apresentou melhor aplicabilidade em larga escala.

2.2.2 Múltiplos Compartimentos

Muyldermans e Pang (2010) apresentaram um procedimento para resolver o problema de roteamento de veículos com vários compartimentos para atender clientes com demandas por diferentes produtos. O procedimento começava com uma solução *Clarke e Wright*, que foi posteriormente aprimorada pela investigação de uma combinação de movimentos de pesquisa local. Foram adotadas listas e marcações de vizinhos para acelerar as pesquisas e o algoritmo foi testado em 19 instâncias. Os resultados mostraram que a distribuição por veículos com vários compartimentos era melhor do que a distribuição separada com caminhões não particionados.

Reed, Yiannakou e Evering (2014) utilizaram o Sistema de Colônia de Formigas (ACS) para resolver o problema de roteamento de veículos capacitados associado à coleta de resíduos recicláveis de residências. No Reino Unido, os resíduos recicláveis gerados pelas famílias eram recolhidos pelas autoridades locais com veículos próprios ou contratados por empresas privadas. Os estudos mostraram que os custos logísticos representaram a maior parte do custo total da reciclagem, o que mostrava a importância de conceber as rotas mais econômicas usando o número mínimo de veículos. O algoritmo ACS produziu soluções de alta qualidade para problemas com veículos com dois compartimentos.

Henke, Speranza e Wäscher (2015) discutiram um problema de roteamento de veículos com capacidade definida para coleta de diferentes resíduos de vidro. Vidros de cores diferentes disponíveis nos locais dos clientes deveriam ser recolhidos e transferidos para um depósito central, no entanto, durante o transporte, eles não deveriam ser misturados. Para isso, foi utilizado um dispositivo específico, que

permitia separar a capacidade de cada veículo individualmente em um número limitado de compartimentos. O número de compartimentos, nos quais a capacidade de um veículo era dividida, poderia ser idêntico ao número de tipos de produtos (tipos de resíduos de vidro), mas também poderia ser menor. Para esse problema, foi desenvolvida uma formulação de modelo e um algoritmo de busca de vizinhança variável para sua solução. Além disso, foram investigados os benefícios da introdução de compartimentos nos veículos e foram investigadas as diminuições dos custos do uso de veículos com múltiplos compartimentos de tamanhos flexíveis sobre o uso de veículos com um único compartimento. Como resultado, como uso de compartimentos de tamanho flexível os custos totais das viagens necessárias para a coleta de todos os suprimentos foram reduzidos drasticamente.

Lahyani *et al.* (2015) resolveram um problema de roteamento de veículos com vários produtos, períodos e múltiplos compartimentos resultante da coleta de azeite na Tunísia. Os escritórios regionais de coleta dispõem de uma frota de veículos para coletar um ou vários tipos de azeite de um conjunto de produtores. Para cada requisição, a quantidade oferecida por um produtor muda dinamicamente no horizonte de planejamento. Existe ainda o requisito de limpar os compartimentos, dependendo das decisões de atribuição e programação de óleo nos compartimentos dos veículos. Foi desenvolvida uma formulação matemática do problema e, em seguida, um algoritmo exato *branch-and-cut* para resolver o problema. O algoritmo foi testado em vários conjuntos de instâncias realistas e os resultados experimentais mostraram a eficácia do algoritmo proposto.

Abdulkader, Gajpal e Elmekawy (2015) abordaram o problema da coleta de lixo em locais onde o lixo deveria ser recolhido e armazenado em diferentes compartimentos no mesmo veículo. A demanda de cada cliente para cada produto era constante e previamente conhecida e os produtos deveriam ser armazenados em diferentes compartimentos do mesmo veículo enquanto eram transportados juntos. Os clientes eram atribuídos às rotas, e era verificado se a demanda total de clientes atribuídos a qualquer rota para determinado produto não excedeu a capacidade do compartimento reservado para esse produto. O problema seria decidir quais clientes deveriam ser designados juntos em uma única viagem e a ordem de visitá-los, visando minimizar a

distância total de viagem. Foi desenvolvido um algoritmo que combinava pesquisa local com um algoritmo de colônia de formigas para resolver o problema, em seguida o algoritmo desenvolvido foi comparado com um algoritmo de colônia de formigas existente. Os resultados do estudo mostraram que a duração média das viagens aumentou em 70% quando veículos de compartimento único eram usados para atender os clientes.

Silvestrin e Ritt (2017) estudaram uma variante do problema de roteamento de veículos que permite veículos com vários compartimentos. Diferente das abordagens anteriores, as demandas por diferentes tipos de produtos poderiam ser atendidas em várias visitas sem a sobrecarga de representar cada demanda separadamente. Eles propuseram uma heurística de pesquisa tabu e a incorporaram em uma pesquisa local iterada para resolver o MCVRP. Em várias experiências, foi verificado que a heurística criada produzia soluções melhores que os algoritmos heurísticos existentes.

Alinaghian e Shokouhi (2018) apresentaram um modelo matemático para o problema de roteamento de veículos com múltiplos compartimentos cuja função objetivo do problema proposto incluía a minimização do número de veículos e a minimização do total de rotas percorridas. A entrega dividida para um determinado produto não era permitida e a demanda de um cliente para um determinado produto deveria ser totalmente entregue por um único veículo, no entanto, a entrega dividida para um conjunto de produtos solicitados era permitida. Um algoritmo híbrido composto por busca adaptativa de vizinhança grande e vizinhança variável foi desenvolvido e seu desempenho foi avaliado comparando seus resultados com os resultados do método exato. Os resultados demonstraram o bom desempenho do algoritmo híbrido proposto.

Ostermeier e Hübner (2018) abordaram o problema de roteamento e seleção de veículos com vários compartimentos e de veículos simples para distribuição de mercearias. Foram identificados os custos dependentes dos veículos e o problema foi resolvido com uma pesquisa de vizinhança grande com testes para áreas urbanas e rurais, variações no tamanho dos pedidos e cenários com estruturas de pedidos

variadas. Foi mostrado que a frota mista é melhor do que uma frota exclusiva, uma frota mista pode reduzir os custos em até 30%.

Chen e Shi (2019) apresentaram um problema de roteamento de veículos com vários compartimentos com janela de tempo (MCVRPTW). Com base na formulação matemática estabelecida para o problema foram propostas e comparadas duas abordagens de solução, sendo uma a otimização de enxame de partículas híbrida (HPSO) com recozimento simulado, e a outra a otimização de enxame de partículas convencional. Foram desenvolvidas instâncias experimentais com 25 clientes, 50 clientes e 100 clientes para investigar o desempenho das abordagens da solução proposta. Os resultados indicaram que ambas as abordagens eram razoavelmente eficientes para o MCVRPTW.

Kaabachi *et al.* (2019) apresentaram um problema de minimizar a distância total percorrida ao usar um número mínimo de caminhões. Diferentes tipos de produtos eram carregados em uma frota de caminhões homogêneos com capacidade idêntica de compartimentos. Um modelo matemático no qual a demanda total do cliente para cada produto deveria ser totalmente entregue por um único caminhão e não exceder a capacidade do compartimento do caminhão foi desenvolvido. Dois algoritmos para resolver o MCVRP foram propostos: um algoritmo híbrido de colônia artificial de abelhas e um algoritmo híbrido de vizinhança variável geral auto-adaptável. Os algoritmos propostos foram testados usando uma situação real, o transporte de gasolina por empresa regional localizada no sul da Itália.

Chen, Liu e Langevin (2019) estudaram o problema de roteamento de veículos derivado de uma empresa de distribuição de cadeia de suprimento controlada por temperatura de Xangai. A empresa utilizava uma frota de veículos com vários compartimentos para abastecer clientes com alimentos perecíveis frescos dentro de um determinado período de tempo. A temperatura dos veículos dependia muito da extensão da rota e do número de paradas e, para manter a temperatura, o motor deveria funcionar durante períodos de espera. Um modelo matemático foi fornecido e um algoritmo adaptável de busca de vizinhança grande (ALNS) foi desenvolvido para resolver o problema. Os experimentos computacionais demonstram a eficácia e a

eficiência do algoritmo ALNS em comparação com o método manual, baseado principalmente na experiência dos motoristas.

Martins *et al.* (2019) abordaram uma configuração de vários períodos com uma atribuição de janela de tempo orientada ao produto para atender supermercados. Na prática, as janelas de tempo não eram restrições rígidas e entregas fora dos limites da janela de tempo eram possíveis com um impacto negativo para as operações na loja. Uma frota foi usada para distribuição e uma janela de tempo exclusiva para a entrega de cada segmento de produto a cada loja foi definida ao longo do horizonte de planejamento. Uma busca adaptativa de grandes bairros (ALNS) foi proposto para resolver o problema. A abordagem foi testada em instâncias de referência da literatura para demonstrar sua eficácia e as experiências numéricas demonstraram que o planejamento da distribuição consistente de veículos com múltiplos compartimentos leva a melhores soluções gerais do que os resultados anteriores.

Eshtehadi, Demir e Huang (2020) também utilizaram um algoritmo de busca na vizinhança grande (ALNS) aprimorado para a solução de um problema de roteamento de veículos com vários compartimentos. Entretanto, eles consideraram a incerteza no tempo do tempo de serviço e no tempo de viagem no problema. A incerteza no tempo de viagem poderia ser causada por tráfego, situações climáticas, acidente ou defeito do veículo, já a incerteza no tempo de serviço poderia ser causada por perda de tempo na localização de um endereço ou atraso na resposta do cliente. Para avaliar numericamente o algoritmo meta-heurístico proposto foram criados vários conjuntos de instâncias com base nos dados geográficos de Londres e os resultados computacionais mostraram soluções de boa qualidade em instâncias com até 200 clientes.

2.2.3 Resumo da revisão bibliográfica sobre roteirização de veículos com múltiplos compartimentos e múltiplos depósitos

Conforme apresentado nas subseções anteriores, existem alguns estudos a respeito de roteirização de veículos com múltiplos compartimentos, porém não foram

encontrados artigos que considerassem ao mesmo tempo frota heterogênea, janela de tempo e múltiplos depósitos, características que serão abordadas nesse trabalho. Apenas o artigo de Alinaghian e Shokouhi (2018) tratou de múltiplos compartimentos com múltiplos depósitos.

Quando se pesquisa sobre a aplicação ao modal marítimo, temos poucos trabalhos que consideram mais de um compartimento. A maioria dos estudos de Roteamento de inventário marítimo e da cadeia de suprimentos não considera a alocação de produtos em compartimentos e supõe que esse problema possa ser resolvido pelas pessoas responsáveis pelo armazenamento ou como um problema de planejamento separado (CHRISTIANSEN *et al.*, 2013).

A Tabela 1 apresenta, em ordem cronológica, a revisão da literatura sobre o MCVRP e MDVRP, destacando algumas características relevantes para o estudo. Na última linha da tabela são marcadas as principais características do modelo matemático proposto neste trabalho, podendo evidenciar suas diferenças para os demais modelos.

Tabela 1: Resumo Dos Artigos Publicados Sobre Veículos Com Múltiplos Compartimentos e múltiplos depósitos.

(continua)

Referências	Ano								Objetivo: o que Minimiza	Aplicação
		Frota heterogênea	Frota homogênea	Hard time Windows	Soft time windows	Múltiplos depósitos	Múltiplos compartimentos	Método heurístico		
Muyldermans e Pang	2010		x				x	x	Distância percorrida	Genérica
Ramos <i>et al.</i>	2014		x			x		x	Distância percorrida e emissões de gás carbônico	Coleta de lixo reciclável
Reed, Yiannakou e Evering	2014		x				x	x	Custo da rota	Resíduos residenciais destinados a reciclagem
Abdulkader, Gajpal e Elmekkawy	2015		x				x	x	Custo da rota	Coleta de resíduos
Allahyari, Salari e Vigo	2015		x			x		x	Custos para os veículos nos arcos e para os clientes chegarem ao seu ponto de encontro na rota	Genérica
Henke, Speranza e Wäscher	2015		x				x	x	Custo da rota	Coleta de resíduos de vidro
Karakatič e Podgorelec	2015		x			x		x	Distância e número de veículos	Genérica
Lahyani <i>et al.</i>	2015	x					x		Custo da rota, custo fixo do veículo e custo da limpeza do compartimento	Coleta de azeite
Calvet <i>et al.</i>	2016		x			x		x	Maximizar a receita menos os custos	Genérica
Li J., Li Y. e Pardalos	2016		x	x		x		x	Distância	Genérica
Wang <i>et al.</i>	2016		x			x		x	Duração da rota mais longa	Genérica
Chen e Yang	2017		x			x		x	Tempo total dos veículos	Entrega de produtos marinhos em Dalian (China)
Silvestrin e Ritt	2017		x				x	x	Tempo	Genérica

Tabela 1: Resumo Dos Artigos Publicados Sobre Veículos Com Múltiplos Compartimentos e múltiplos depósitos.

(conclusão)

Referências	Ano	Frota heterogênea	Frota homogênea	Hard time Windows	Soft time windows	Múltiplos depósitos	Múltiplos compartimentos	Método heurístico	Objetivo: o que Minimiza	Aplicação
Alinaghian e Shokouhi	2018		x			x	x	x	Distância percorrida custo fixo dos veículos	Genérica
Ostermeier e Hübner	2018	x					x	x	Custos de carga, transporte e descarga	Distribuição para mercearias
Paz, Granada-Echeverri e Escobar	2018		x	X		x			Distância total percorrida, número de veículos ou estações de carregamento	Veículos elétricos
Bertazzi <i>et al.</i>	2019		x	X		x			Custo total	Nanostores
Chen e Shi	2019		x	x			x	x	Custo da rota	Genérica
Chen, Liu e Langevin	2019		x	x			x	x	Custo fixo dos veículos, custo de viagem e custos de consumo de combustível e de espera	Alimentos perecíveis
Kaabachi <i>et al.</i>	2019		x				x	x	Distância percorrida	Transporte de gasolina
Martins <i>et al.</i>	2019		x	x	x		x	x	Custos de carga, transporte, descarga e de penalidade por entregas fora dos limites das janelas de tempo	Supermercados
Eshtehadi, Demir e Huang	2020		x	x			x	x	Custos fixos e operacionais dos veículos, considerando a energia necessária para vários compartimentos	Códigos postais de Londres
Wang <i>et al.</i>	2020	x			x	x		x	Custo total e número de veículos	Rede logística
Zhen <i>et al.</i>	2020		x	x		x		x	Tempo total dos veículos	Compras online
Estudo proposto neste trabalho	2021	x		x		x	x		Custo total	Diferentes tipos de petróleo

3 PROBLEMA ESTUDADO

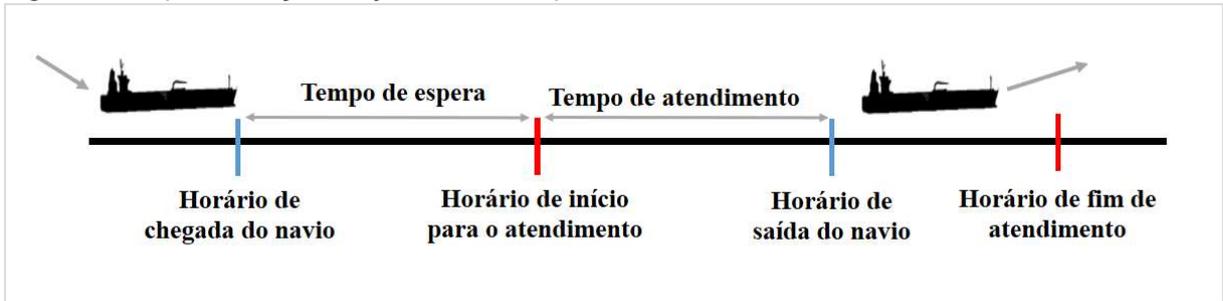
Essa dissertação estuda um problema de uma empresa de exploração e produção de petróleo que deve planejar rota de navios para transporte de diferentes tipos de petróleo extraídos de plataformas *offshore*. O óleo produzido precisa ser transferido para portos e posteriormente para refinarias.

A empresa estudada atende em torno de 45 plataformas de petróleo cujo óleo produzido precisa ser retirado de seus tanques de armazenamento. Cada plataforma, ao longo do horizonte de planejamento, pode solicitar diversos alívios, e cada alívio é atendido uma única vez por um navio. O navio, por sua vez, pode transportar, simultaneamente, o óleo de mais de uma plataforma no mesmo compartimento do navio, desde que sejam compatíveis.

Cada solicitação de atendimento é caracterizada como uma *n-upla* formada por {plataforma, momento inicial quando é possível começar o atendimento, momento final limite para começar o atendimento}. A data e hora inicial e a data e hora final definem os limites de uma janela de tempo, quando deverá ocorrer o atendimento em única visita. Como as plataformas operam de forma contínua, sem interrupções, o óleo deve ser retirado de seus tanques no máximo na data e hora final prevista, para que não seja necessário interromper a produção devido à indisponibilidade de espaço nos seus tanques de armazenagem. Cada atendimento representa volume a ser aliviado de uma plataforma e que deve ser direcionado a algum dos portos que atende a empresa.

Se o navio chegar antes da data hora definida no atendimento nas plataformas ele terá que esperar para ser atendido. Se o navio chegar depois da data hora definida a plataforma terá que diminuir a produção de petróleo por não ter espaço para armazenar o óleo produzido, o que não é o desejado. A Figura 6 representa um navio que chega para atendimento antes da janela de tempo.

Figura 6: Representação da janela de tempo



Um ou mais navios sem carga saem dos portos com destino a retirar o óleo dos atendimentos solicitado. A partir das demandas dos atendimentos é possível planejar qual navio será atribuído a qual atendimento e para qual porto o óleo será escoado. Os objetivos do planejamento são reduzir os custos de transporte (custo de afretar navios mais o custo por quilômetro navegado) e reduzir a quantidade de porões utilizados em cada viagem, visando a agilidade do descarregamento no porto.

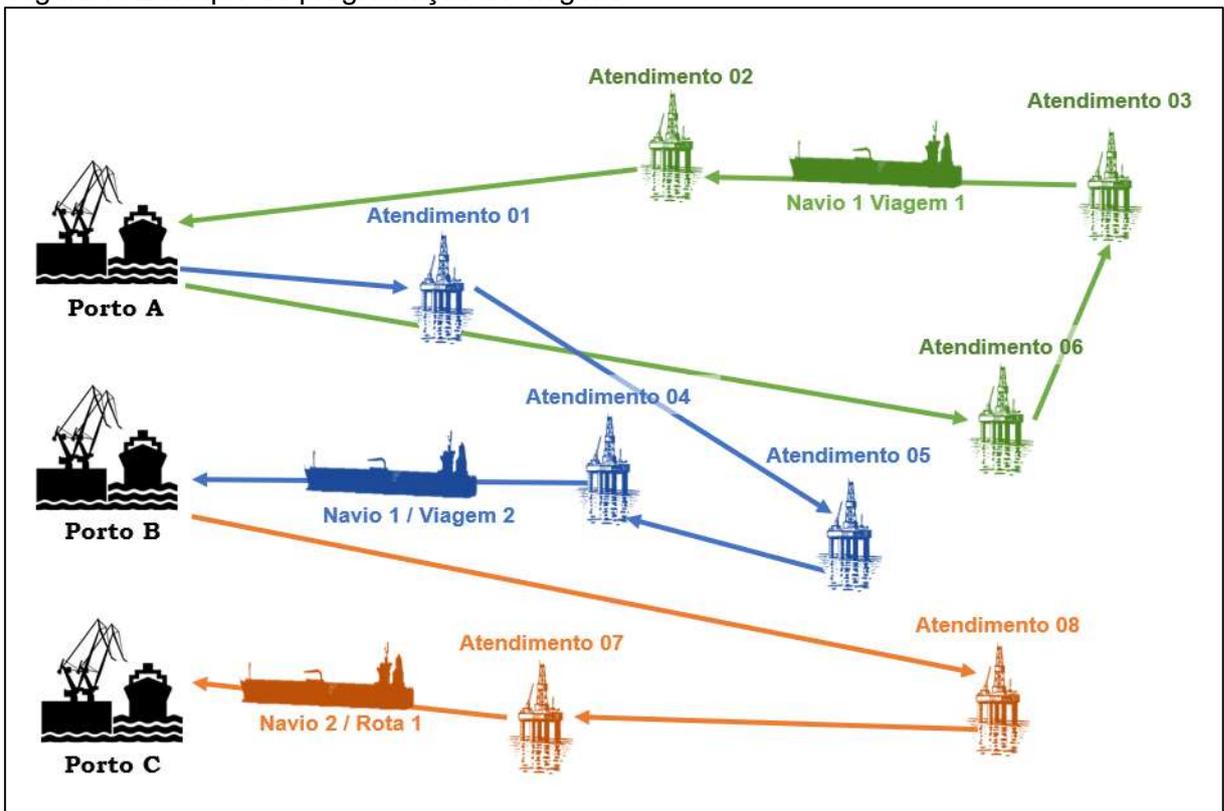
O navio deve possuir capacidade de armazenamento livre maior que o volume solicitado no atendimento para ser escolhido para uma plataforma específica, além de não ter restrições de acesso a mesma. É importante frisar que os navios utilizados para alívio das plataformas têm capacidades, custos e velocidades de operação diferentes entre si.

Cada plataforma produz um petróleo cru específico, devido às características geológicas dos reservatórios interligados às plataformas pelos poços. Esses produtos podem ser agrupados em alguns tipos de forma a otimizar o refino e transporte. É possível misturar no mesmo compartimento de um navio óleo de mais de um atendimento, desde que sejam do mesmo tipo.

Após realizar a carga de óleo da plataforma definida, o navio pode se deslocar para outra plataforma, caso seus compartimentos ainda tenham espaço disponível para outros atendimentos, ou pode se deslocar para realizar a descarga do óleo em algum porto. Quanto maior o tempo de viagem do navio, maiores são os custos envolvidos e maiores são os riscos de atrasos devidos a problemas de mal tempo e problemas operacionais.

Os navios podem realizar mais de uma viagem caso não consigam ir em todas as plataformas saindo dos portos apenas uma vez. A Figura 7 apresenta um exemplo de programação de viagens para oito atendimentos e dois navios. Na primeira viagem do Navio 1, representada pela cor verde, parte do porto A, recebendo óleo dos atendimentos 06, 03 e 02 e em seguida retorna para o porto A, onde descarrega o óleo acumulado. Em seguida, o mesmo navio faz uma segunda viagem, representada pela cor verde, saindo do porto A para o atendimento 01, depois chegue para o atendimento 05, depois para o atendimento 04 e descarrega o petróleo coletado no porto B. Já o Navio 2 realiza apenas uma viagem representada pela cor laranja. O navio sai do porto B, recebe o óleo do atendimento 08 e em seguida do atendimento 07 e descarrega a carga no porto C.

Figura 7: Exemplo de programação de viagens



O navio carregado pode ir para qualquer porto que atenda suas condições de calado (parte do navio que fica submersa na água), comprimento e boca, não precisando retornar para seu porto de origem. O navio que atracar no berço de um porto deve ter dimensões lineares menores que o máximo previsto para o porto.

Em resumo, o problema tratado na presente dissertação, tem o objetivo de planejar as operações de transporte de óleo cru, desde plataformas *offshore* a portos, a fim de minimizar custos de viagem considerando as seguintes premissas: navios heterogêneos em termos de custo e capacidade, diferentes tipos de produto, mais de um porto possível para entrega dos produtos, restrições de acesso dos navios, períodos restritos para as plataformas realizarem alívios e múltiplos porões dos navios. É necessário considerar ainda que cada navio iniciaria sua próxima viagem no porto que terminou a última viagem.

Não foi encontrado, na literatura pesquisada, nenhum modelo matemático que incorpore essa realidade ou essas restrições em um único modelo que fosse aplicado ao planejamento da logística do setor de petróleo e gás ou do setor marítimo.

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Nesse capítulo será apresentada a modelagem matemática considerando as restrições do problema real. Até a data atual, não foi encontrado nenhum trabalho que considere todas as restrições apresentadas.

Como o problema não permite que diferentes produtos sejam transportados no mesmo compartimento do navio deve-se considerar o *Multi-Compartment Vehicle Routing Problem* (MCVRP) no modelo matemático, conforme Abdulkader *et al.* (2015). Como os navios podem realizar múltiplas viagens deve-se considerar o modelo *Multi-Trip Vehicle Routing Problem* (MTVRP), conforme Cattaruzza *et al.* (2018). Como o problema considera que existem vários portos e que uma viagem pode começar em um porto e terminar em outro porto, deve-se considerar o modelo *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP), conforme Montoya-Torres *et al.* (2015). Como certos navios não podem atracar em algumas plataformas ou portos, deve-se considerar o modelo *Site Dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP), conforme Zare-Reisabadi e Mirmohammadi (2015). Como o atendimento a uma determinada plataforma deve ocorrer em um determinado intervalo de tempo deve-se considerar ainda o modelo *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW), conforme Canhong *et al.* (2014). Por fim, como são utilizados diferentes tipos de navios deve-se considerar o modelo *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* (HFVRP), conforme Belfiore e Yoshizaki (2009).

O problema do modelo matemático consiste em buscar, para cada período, o roteamento dos veículos, considerando n_r número de viagens, n_p portos, n_t atendimentos, n_{tv} tipos de navios e n_v navios com n_w porões que transportam n_g tipos de produto. O modelo matemático proposto será apresentado a seguir em cinco partes: conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e restrições.

Conjuntos:

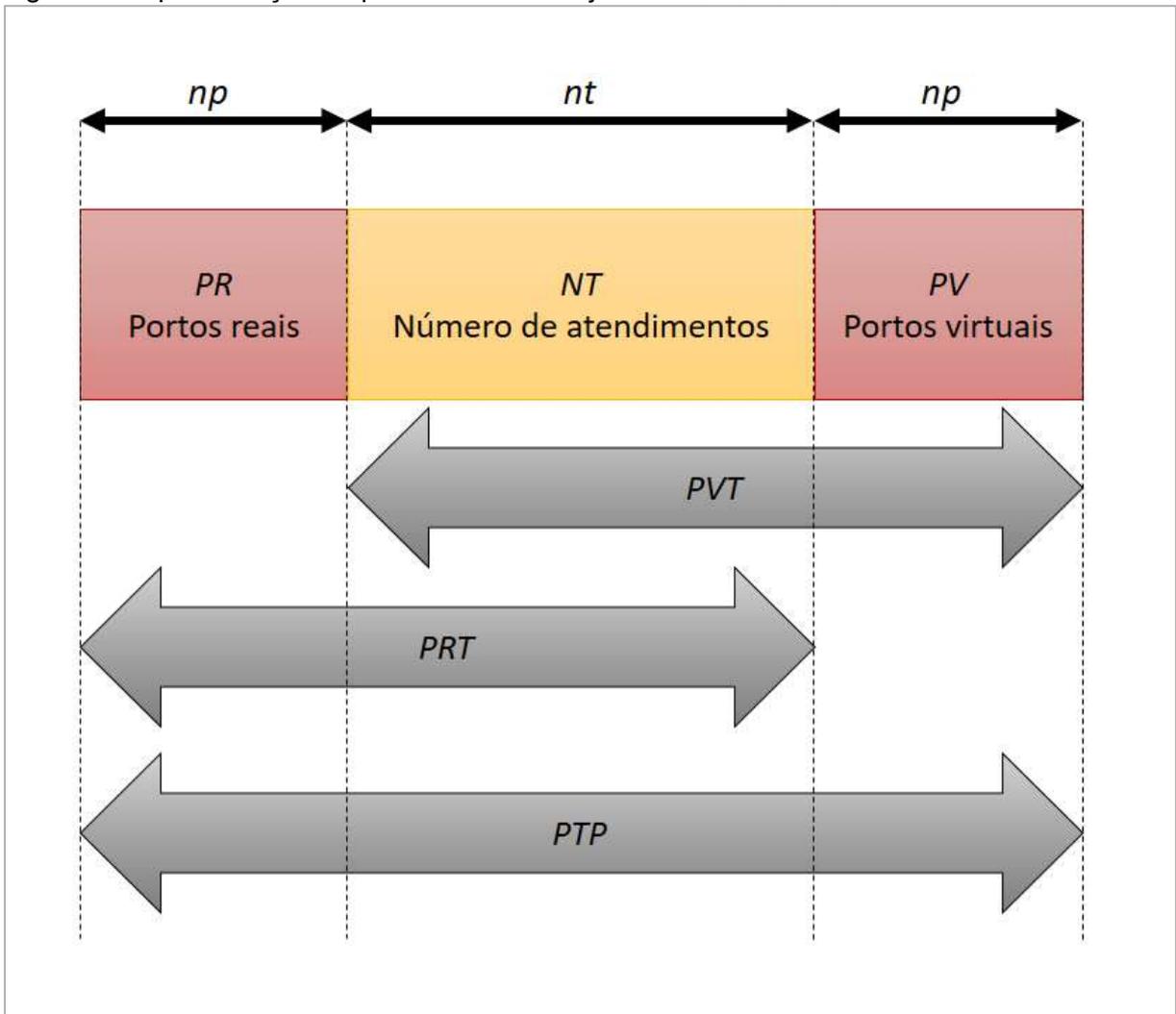
PR Conjunto de portos reais, $PR = \{1, \dots, n_p\}$;

NT Conjunto de atendimentos (Solicitações das plataformas), $NT =$

- $\{(n_p + 1), \dots, (n_p + n_t)\};$
- PV* Conjunto de portos virtuais, $PV = \{(n_p + n_t + 1), \dots, ((2 n_p) + n_t)\};$
- PVT* Conjunto de atendimentos mais os portos virtuais, $PVT = \{(n_p + 1), \dots, ((2 * n_p) + n_t)\};$
- PRT* Conjunto de portos reais e atendimentos, $PRT = \{1, \dots, (n_p + n_t)\};$
- PTP* Conjunto de portos reais, atendimentos e portos virtuais, $PTP = \{1, \dots, ((2 * n_p) + n_t)\};$
- MD* Conjunto de navios, $MD = \{1, \dots, n_v\};$
- R* Conjunto máximo de viagem que podem ser realizadas pelos navios, $R = \{1, \dots, n_r\};$
- P* Conjunto de produtos, $P = \{1, \dots, n_g\};$
- W* Conjunto máximo de compartimentos que os navios podem ter, $W = \{1, \dots, n_w\};$
- TV* Conjunto de tipos de navios, $TV = \{1, \dots, n_{tv}\}.$

A Figura 8 é uma representação esquemática dos conjuntos *PR, NT, PV, PVT, PRT e PTP* em função do número de portos n_p e do número de atendimentos n_t . Os nós utilizados na modelagem matemática estão nesses conjuntos. Os navios só podem começar uma viagem em um dos portos reais do conjunto PR. Os portos virtuais do conjunto PV têm a mesma localização geográfica dos portos reais, mas podem apenas receber os navios no fim das viagens. Cada viagem sempre deve terminar em um porto virtual.

Figura 8: Representação esquemática dos conjuntos PR, NT, PV, PVT, PRT e PTP



Parâmetros:

- $tv_{i,j}$ Tempo de viagem entre plataformas e portos reais $i \in PTP$ e plataformas e portos virtuais $j \in PTP$;
- a_i Momento de início do período que é possível começar a retirar petróleo do atendimento $i \in NT$;
- b_i Momento final do período que é possível começar a retirar petróleo do atendimento $i \in NT$;
- tt Período de planejamento;

mt_i	Tempo de manobra ou de atracação dos navios na plataforma ou no porto $i \in PTP$;
$ot_{i,p}$	Velocidade da operação de descarregamento do produto $p \in P$ na plataforma ou no porto $i \in PTP$;
$q_{i,p}$	Volume de cada produto $p \in P$ de cada plataforma $i \in PTP$;
$d_{i,j}$	Distância entre plataformas e portos reais $i \in PTP$ e plataformas e portos virtuais $j \in PTP$;
ck_v	Custo do quilometro percorrido do navio $v \in MD$;
cf_v	Custo fixo para utilizar o navio $v \in MD$;
lp_v	Porto onde o navio $v \in MD$ se encontra para a primeira viagem;
$cc_{v,w}$	Capacidade máxima do compartimento $w \in W$ do navio $v \in MD$;
vt_v	Tipo do navio $v \in MD$;
$vtc_{i,vt}$	Parâmetro que vale 1 se o tipo de navio $vt \in TV$ pode atender a plataforma ou porto $i \in PTP$, e zero caso contrário;
mv_i	Capacidade máxima de navios que o porto $i \in PV$ pode operar no período de planejamento;
φ	Porcentual da capacidade máxima de que cada navio pode ter antes de ir para um atendimento;
M	Um número arbitrariamente grande para a lógica do modelo, foi adotado o valor de 99.999,00;
m	Um número arbitrariamente pequeno para a lógica do modelo, foi adotado o valor de 0,0001.

Variáveis de decisão:

- $x_{i,j,v,r}$ Variável binária que assume o valor 1 caso o navio $v \in MD$ viaje do nó $i \in PTP$ para o nó $j \in PTP$ na viagem $r \in R$ e 0, caso contrário;
- $z_{p,w,v,r}$ Variável binária que assume o valor 1 caso o produto $p \in P$ esteja no compartimento $w \in W$ na viagem $r \in R$ do navio $v \in MD$ e 0, caso contrário;
- $t_{i,v,r}$ Tempo que o veículo $v \in MD$ chega no nó $i \in PTP$ na viagem $r \in R$;
- $Q_{i,v,r}$ Volume dos produtos do navio $v \in MD$ quando chega no nó $i \in PTP$ na viagem $r \in R$;
- $qc_{i,p,w,v,r}$ Volume dos produtos em cada compartimento $w \in W$ do navio $v \in MD$, na viagem $r \in R$, quando chega no atendimento $i \in NT$;
- vu_v Variável de decisão binária que assume 1 caso o veículo $v \in MD$ seja utilizado na roteirização e 0, caso contrário.

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar} \\ & \sum_{v \in MD} cf_v vu_v + \sum_{i \in PTP} \sum_{j \in PTP} \sum_{v \in MD} \sum_{r \in R} ck_v d_{i,j} x_{i,j,v,r} + \sum_{p \in P} \sum_{w \in W} \sum_{v \in MD} \sum_{r \in R} z_{p,w,v,r} \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeito a restrições de roteamento:

$$\sum_{v \in MD} \sum_{r \in R} \sum_{j \in PTP} x_{i,j,r,v} = 1 \quad \forall i \in NT \quad (2)$$

$$\sum_{i \in PR} \sum_{j \in PVT} x_{i,j,r,v} = 1 \quad \forall v \in MD, r \in R \quad (3)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{i \in PR} \sum_{j \in PVT} x_{i,j,r,v} \leq nr \quad \forall v \in MD \quad (4)$$

$$\sum_{i \in PR, i \neq lp_v} \sum_{j \in PVT} x_{i,j,v,1} = 0 \quad \forall v \in MD \quad (5)$$

$$\sum_{j \in PVT} x_{i,j,v,r} \leq \sum_{h \in PRT} x_{h,(i+np+nt),v,(r-1)} \quad \forall i \in PR, \quad (6)$$

$$v \in MD, \quad r \in R | r \geq 2$$

$$\sum_{i \in PRT} \sum_{j \in PV} x_{i,j,v,r} = 1 \quad \forall v \in MD, r \in R \quad (7)$$

$$\sum_{i \in PV} \sum_{j \in PTP} \sum_{r \in R} x_{i,j,v,r} = 0 \quad \forall v \in MD \quad (8)$$

$$\sum_{i \in PTP} \sum_{j \in PR} \sum_{r \in R} x_{i,j,v,r} = 0 \quad \forall v \in MD \quad (9)$$

$$\sum_{j \in PVT} x_{h,j,v,r} - \sum_{i \in PRT} x_{i,h,v,r} = 0 \quad \forall v \in MD, h \in NT, r \in R \quad (10)$$

$$x_{i,i,v,r} = 0 \quad \forall v \in MD, i \in PTP, r \in R \quad (11)$$

Sujeito a restrições temporais:

$$t_{j,v,r} \geq t_{i,v,r} + \left(tv_{i,j} + mt_i + \sum_{p \in P} \frac{q_{i,p}}{ot_{i,p}} \right) x_{i,j,v,r} - (1 - x_{i,j,v,r}) M \quad \forall v \in MD, \quad (12)$$

$$i \in PRT, \quad j \in PVT, r \in R$$

$$t_{i,v,r} \geq t_{(i+np+nt),v,(r-1)} + \sum_{j \in NT} \sum_{p \in P} \sum_{w \in W} qc_{j,p,w,v,(r-1)} / ot_{i,p} + mt_{i+np+nt} \sum_{h \in NT} x_{h,(i+np+nt),v,(r-1)} - \left(1 - \sum_{h \in PRT} x_{h,(i+np+nt),v,(r-1)} \right) M \quad \forall v \in MD, \quad (13)$$

$$i \in PR, \quad r \in R | r \geq 2$$

$$t_{i,v,r} \leq M \sum_{h \in PRT} x_{h,(i+np+nt),v,(r-1)} \quad \forall v \in MD, \quad (14)$$

$$i \in PR, \quad r \in R | r \geq 2$$

$$t_{(i+np+nt),v,r} \leq M \sum_{h \in PRT} x_{h,(i+np+nt),v,r} \quad \forall v \in MD, \quad (15)$$

$$i \in PR, r \in R$$

$$t_{i,v,r} \leq M \sum_{h \in PVT} x_{i,h,v,r} \quad \forall v \in MD, \quad (16)$$

$$i \in PR, r \in R$$

$$t_{i,v,r} \geq a_i \sum_{j \in PVT} x_{i,j,v,r} \quad \forall i \in NT, \quad (17)$$

$$v \in MD, r \in R$$

$$t_{i,v,r} \leq b_i \sum_{j \in PVT} x_{i,j,v,r} \quad \forall i \in NT, \quad (18)$$

$$v \in MD, r \in R$$

$$t_{i,v,r} \leq tt \quad \forall i \in PVT, \quad (19)$$

$$v \in MD, r \in R$$

Sujeito a restrições de carregamento:

$$\sum_{i \in PR} \sum_{j \in NT} \sum_{r \in R} x_{i,j,v,r} \geq v u_v m \quad \forall v \in MD \quad (20)$$

$$\sum_{i \in PR} \sum_{j \in NT} \sum_{r \in R} x_{i,j,v,r} \leq v u_v M \quad \forall v \in MD \quad (21)$$

$$\sum_{v \in MD} v u_v \leq n v \quad (22)$$

$$\sum_{v \in MD} v u_v \geq 1 \quad (23)$$

$$\sum_{i \in PTP} x_{i,j,v,r} = 0 \quad \forall j \in PTP, \quad (24)$$

$$v \in MD, r \in R |$$

$$v t c_{j, v t_v} = 0$$

$$\sum_{j \in ETP} x_{i,j,v,r} = 0 \quad \forall i \in PTP, \quad (25)$$

$$v \in MD, r \in R |$$

$$v t c_{i, v t_v} = 0$$

$$\sum_{i \in NT} \sum_{v \in MD} \sum_{r \in R} x_{i,j,v,r} \leq m v_j \quad \forall j \in PV \quad (26)$$

$$z_{p,w,v,r} \leq M \sum_{i \in NT} qc_{i,p,w,v,r} \quad \forall v \in MD, \quad (27)$$

$$p \in P, w \in W,$$

$$r \in R$$

$$z_{p,w,v,r} \geq m \sum_{i \in NT} qc_{i,p,w,v,r} \quad \forall v \in MD, \quad (28)$$

$$p \in P, w \in W,$$

$$r \in R$$

$$\sum_{p \in P} z_{p,w,v,r} \leq 1 \quad \forall v \in MD, \quad (29)$$

$$w \in W, r \in R$$

$$\sum_{w \in W} qc_{i,p,w,v,r} = q_{i,p} \sum_{j \in PVT} x_{i,j,v,r} \quad \forall i \in NT, \quad (30)$$

$$v \in MD, p \in P,$$

$$r \in R$$

$$\sum_{i \in NT} \sum_{p \in P} qc_{i,p,w,v,r} \leq cc_{v,w} \quad \forall v \in MD, \quad (31)$$

$$w \in W, r \in R$$

$$qc_{i,p,w,v,r} \leq cc_{v,w} \quad \forall v \in MD, \quad (32)$$

$$w \in W,$$

$$r \in R,$$

$$i \text{ in } NT, p \text{ in } P$$

Sujeito a restrições de atendimento:

$$Q_{i,v,r} = 0 \quad \forall v \in MD, i \in \quad (33)$$

$$PR, r \in R$$

$$Q_{i,v,r} \leq \sum_{w \in W} cc_{v,w} \quad \forall i \in PTP, \quad (34)$$

$$v \in MD, r \in R$$

$$Q_{i,v,r} \leq \sum_{w \in W} cc_{v,w} \sum_{j \in PVT} x_{i,j,v,r} \quad \forall i \in PRT, \quad (35)$$

$$v \in MD, r \in R$$

$$Q_{i,v,r} \leq \sum_{w \in W} cc_{v,w} \sum_{j \in NT} x_{i,j,v,r} \quad \forall i \in PV, \quad (36)$$

$$v \in MD, r \in R$$

$$Q_{j,v,r} \leq Q_{i,v,r} + x_{i,j,v,r} \sum_{p \in P} q_{i,p} + M(1 - x_{i,j,v,r}) \quad \forall i \in PRT, \quad (37)$$

$$j \in PVT, v$$

$$\in MD, r \in R$$

$$Q_{j,v,r} \geq Q_{i,v,r} + x_{i,j,v,r} \sum_{p \in P} q_{i,p} - M(1 - x_{i,j,v,r}) \quad \forall i \in PRT, \quad (38)$$

$$j \in PVT, v \in MD, r \in R$$

$$Q_{j,v,r} \leq \varphi \sum_{w \in W} cc_{v,w} \sum_{i \in NT} x_{i,j,v,r} + M(1 - \sum_{i \in NT} x_{i,j,v,r}) \quad \forall j \in NT, \quad (39)$$

$$v \in MD, r \in R$$

$$x_{i,j,v,r} \in \{0,1\} \quad \forall v \in MD, \quad (40)$$

$$i \in PTP, j \in PTP, r \in R$$

$$t_{i,v,r} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in PTP, \quad (41)$$

$$v \in MD, r \in R$$

$$vu_v \in \{0,1\} \quad \forall v \in MD \quad (42)$$

$$qc_{i,p,w,v,r} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall v \in MD, \quad (43)$$

$$i \in PTP, r \in R$$

$$z_{p,w,v,r} \in \{0,1\} \quad \forall v \in MD, p \in \quad (44)$$

$$P, w \in W, r \in R$$

$$Q_{i,v,r} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in PTP, \quad (45)$$

$$v \in MD, r \in R$$

A função objetivo, Equação (1), representa a soma do custo fixo dos navios utilizados e do custo por quilômetro percorrido. A equação considera também o impacto operacional relacionado ao uso de porões. A função objetivo deve ser minimizada.

A Restrição (2) garante que cada atendimento seja suprido apenas uma vez. A Restrição (3) garante que, em uma viagem, o navio só pode sair do porto real para o porto virtual ou sair para um atendimento. A Restrição (4) garante que cada navio não pode exceder o número máximo de viagens previsto. A Restrição (5) garante que os navios, na primeira viagem, só saiam de seus lugares de origem informados. A Restrição (6) garante que um navio, na segunda viagem em diante, saia do mesmo porto onde terminou a viagem anterior. A restrição (7) garante que em cada viagem o

navio deve chegar em apenas um porto. A Restrição (8) define que nenhum navio pode sair do porto virtual. A Restrição (9) define que nenhum navio pode chegar no porto real, do porto real só podem sair navios. As restrições (10) e (11) se referem a conservação de fluxo.

A Restrição (12) garante que o tempo de operação de um atendimento j começa após a saída do navio do nó i mais os tempos de operação no nó j , de manobra ou de atracação do navio e o tempo de deslocamento de i para j . A Restrição (13) garante que o tempo de início da segunda viagem em diante considere o tempo que o navio finalizou a viagem anterior. A Restrição (14) garante que o tempo de início da segunda viagem em diante será nulo se o navio não foi utilizado na viagem anterior. As restrições (15) e (16) garantem que o tempo será nulo se o navio não foi utilizado na viagem. As restrições (17) e (18) garantem que o navio chega dentro da janela de tempo permitida para atender a plataforma. A Restrição (19) limita o tempo máximo das viagens.

As restrições (20) e (21) verificam os navios que foram utilizados na roteirização e as restrições (22) e (23) verificam se a quantidade de navios utilizados é menor que a quantidade total disponível e se pelo menos um navio foi utilizado. As restrições (24) e (25) definem que o navio só pode atender à plataforma ou porto se seu tipo for compatível com o atendimento solicitado. A Restrição (26) limita a quantidade máxima de navios que podem descarregar o petróleo em cada porto. As restrições (27), (28) e (29) representam que pode existir apenas um tipo de petróleo dentro de um porão. A Restrição (30) representa que o volume de cada produto de cada atendimento nos porões do navio utilizado deve ser igual à solicitação do atendimento. As restrições (31) e (32) definem que o volume em cada porão de cada navio não pode ultrapassar sua capacidade máxima.

A Restrição (33) assegura que cada navio sempre deve sair do porto sem carga. As restrições (34), (35) e (36) garantem que o volume carregado no navio nunca irá exceder a capacidade máxima informada. As restrições (37) e (38) garantem que o volume de petróleo do navio corresponda à soma dos volumes dos atendimentos cujo petróleo já tenha sido coletado pelo navio em questão em uma viagem. A Restrição

(39) representa que cada navio só poderá ir para um atendimento se a carga a bordo do navio não exceder uma porcentagem da capacidade máxima do navio, caso a parcela da capacidade máxima tenha excedido o navio só poderá ir para algum porto. Por fim, as restrições (40) a (45) definem os domínios das variáveis.

O modelo matemático proposto possui $|MD| (|PTP|^2 |R| + |P| |W| |R| + 1)$ variáveis de decisão inteiras e $|PTP| |MD| |R| (2 + |P| |W|)$ variáveis de decisão contínuas.

5 GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS

Para gerar as instancias foram selecionadas 10 plataformas da bacia do Espírito Santo e do norte da Bacia de Campos para elaborar o planejamento das viagens. Essas plataformas foram divididas em dois grupos de acordo com a localização física das plataformas. As plataformas P-57, P-58, CAPX, CDAN e CVIX ficam na área do estado do Espírito Santo e suas instâncias projetadas para o período de planejamento possuíam 13 atendimentos. As plataformas CIMA, P-50, P-31, P-54 e P-62 ficam na área do estado do Rio de Janeiro e suas instâncias projetadas para o período de planejamento possuíam 20 atendimentos. Também foram geradas instâncias com 33 atendimentos considerando as 10 plataformas.

Os dados operacionais necessários para o planejamento das viagens incluem informações sobre a frota, sobre os portos e plataformas e sobre os atendimentos. As informações sobre a frota incluem custos fixos mensais por afretamento, custos variáveis em função do deslocamento do navio, a capacidade máxima de cada navio, o número máximo de navios que podem ser utilizados, posição de liberação, número de porções em cada navio e velocidade de navegação. Foram utilizados três tipos de navios com custos fixos e variáveis diferentes, o Navio tipo 1 com 168 mil m³ de capacidade máxima, o Navio tipo 2 com 100 mil m³ de capacidade máxima e o Navio tipo 3 com 156 mil m³ de capacidade máxima.

As informações sobre os portos e plataformas incluem a localização, número máximo de navios aceitos por período de planejamento, existência ou não de Restrição de acesso de algum tipo de navio, e tempo de manobra e atracação dos navios. O tempo de atracação e de desconexão dos navios nas plataformas foi definido como de 6 horas para todos os atendimentos e o tempo de manobra de todos os navios em todos os portos foi definido em 3 horas. Para descarregar o petróleo recolhido das plataformas foram considerados dois portos, o Terminal de Ilha D'agua (Porto 1) e o Terminal Angra dos Reis (Porto 2). A Tabela 2 apresenta a localização das plataformas e dos portos selecionadas em termos de latitude e longitude.

Tabela 2: Posicionamento georreferencial para as plataformas e para os portos

Sigla	Nome	Latitude	Longitude
IDAG	Terminal de Ilha D'agua	-22,81	-43,16
TEBIG	Terminal Angra dos Reis	-23,02	-44,32
CVIX	FPSO Cidade de Vitória	-20,04	-39,53
P-58	FPSO P-58	-21,22	-40,00
CAPX	FPSO Capixaba	-21,24	-39,96
P-57	FPSO P-57	-21,24	-40,05
FCDA	FPSO Cidade de Anchieta	-21,34	-40,06
P-62	FPSO P-62	-21,94	-39,79
P-54	FPSO P-54	-21,97	-39,83
P-50	FPSO P-50	-22,09	-39,83
P-31	FPSO P-31	-22,13	-39,97
CIMA	FSO Cidade de Macaé	-29,10	-40,15

A partir do Posicionamento georreferencial das plataformas e dos portos foi calculada a distância entre cada instalação. A Equação (46) foi utilizada para o cálculo, onde lat_i e lat_j representam as latitudes das instalações i e j, respectivamente, em graus e lon_i e lon_j representam as longitudes das instalações i e j, respectivamente, em graus (Arpini, 2015). O tempo de viagem também foi calculado considerando a velocidade média de navegação de 25 km/h

$$Distância = 6371 \cos^{-1} \left(\cos \left(\pi \frac{(90 - lat_j)}{180} \right) \cos \left((90 - lat_i) \frac{\pi}{180} \right) + \sin \left((90 - lat_j) \frac{\pi}{180} \right) \sin \left((90 - lat_i) \frac{\pi}{180} \right) \cos \left((lon_i - lon_j) \frac{\pi}{180} \right) \right) \quad (46)$$

As informações sobre atendimentos incluem informações sobre o tipo de petróleo, volume a ser retirado, janela de tempo e velocidade de transferência da carga. A partir dos dados da empresa estudada foram geradas trinta e três instâncias divididas em 6 grupos considerando possíveis mudanças no problema, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Características das instâncias

(continua)

Grupo	Análise	Instância	Localização das plataformas	Número de atendimentos	Navios disponíveis			Número porões	Portos	Tipos de produtos	Restrições de acesso de navios		
					Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3				Do tipo 3 em algumas plataformas	Do tipo 1 em algum porto	Limite de carga a bordo para atendimento
Grupo 0	Instância base	1	Área do ES	13	2	2	1	6	1 e 2	3	Sim	Não	60%
		2	Norte do RJ	20	2	2	2	6	1 e 2	3	Sim	Não	60%
		3	ES e Norte do RJ	33	4	3	3	6	1 e 2	3	Sim	Não	60%
Grupo 1	Quantidade de porões	4	Área do ES	13	2	2	1	3	1 e 2	3	Sim	Não	60%
		5	Área do ES	13	2	2	1	1	1 e 2	3	Sim	Não	60%
		6	Norte do RJ	20	2	2	2	3	1 e 2	3	Sim	Não	60%
		7	Norte do RJ	20	2	2	2	1	1 e 2	3	Sim	Não	60%
		8	ES e Norte do RJ	33	4	3	3	3	1 e 2	3	Sim	Não	60%
		9	ES e Norte do RJ	33	4	3	3	1	1 e 2	3	Sim	Não	60%
Grupo 2	Portos disponíveis	10	Área do ES	13	2	2	1	6	Só o 1	3	Sim	Não	60%
		11	Área do ES	13	2	2	1	6	Só o 2	3	Sim	Não	60%
		12	Norte do RJ	20	2	2	2	6	Só o 1	3	Sim	Não	60%
		13	Norte do RJ	20	2	2	2	6	Só o 2	3	Sim	Não	60%
Grupo 3	Quantidade de produtos	14	Área do ES	13	2	2	1	6	1 e 2	2	Sim	Não	60%
		15	Área do ES	13	2	2	1	6	1 e 2	1	Sim	Não	60%
		16	Norte do RJ	20	2	2	2	6	1 e 2	2	Sim	Não	60%
		17	Norte do RJ	20	2	2	2	6	1 e 2	1	Sim	Não	60%

Tabela 3: Características das instâncias

(conclusão)

Grupo	Análise	Instância	Localização das plataformas	Número de atendimentos	Navios disponíveis			Número porções	Portos	Tipos de produtos	Restrições de acesso de navios		
					Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3				Do tipo 3 em algumas plataformas	Do tipo 1 em algum porto	Limite de carga a bordo para atendimento
Grupo 4	Retirada das restrições de acesso de navios às plataformas	18	Área do ES	13	2	2	1	6	1 e 2	3	Não	Não	60%
		19	Área do ES	13	5	0	0	6	1 e 2	3	Não	Não	60%
		20	Área do ES	13	0	0	5	6	1 e 2	3	Não	Não	60%
		21	Norte do RJ	20	2	2	2	6	1 e 2	3	Não	Não	60%
		22	Norte do RJ	20	5	0	0	6	1 e 2	3	Não	Não	60%
Grupo 5	Inclusão de restrição de acesso de navios aos portos	23	Área do ES	13	2	2	1	6	1 e 2	3	Sim	Ao porto 1	60%
		24	Área do ES	13	2	2	1	6	1 e 2	3	Sim	Ao porto 2	60%
		25	Norte do RJ	20	2	2	2	6	1 e 2	3	Sim	Ao porto 1	60%
		26	Norte do RJ	20	2	2	2	6	1 e 2	3	Sim	Ao porto 2	60%
Grupo 6	Alteração de limitação de carga a bordo do navio para atendimento	27	Área do ES	13	2	2	1	6	1 e 2	3	Sim	Não	100%
		28	Área do ES	13	2	2	1	6	1 e 2	3	Sim	Não	50%
		29	Área do ES	13	2	2	1	6	1 e 2	3	Sim	Não	40%
		30	Norte do RJ	20	2	2	2	6	1 e 2	3	Sim	Não	100%
		31	Norte do RJ	20	2	2	2	6	1 e 2	3	Sim	Não	50%
		32	Norte do RJ	20	2	2	2	6	1 e 2	3	Sim	Não	40%
		33	ES e Norte do RJ	33	4	3	3	6	1 e 2	3	Sim	Não	100%

O Grupo 0 contém as Instâncias 1, 2 e 3, que são as instâncias base que serão comparadas com as outras instâncias. As instâncias consideram navios com 6 porções cada um. Os navios do tipo 3 têm restrição de acesso a quatro plataformas. Consideram que a limitação de carga a bordo dos navios para que as plataformas sejam atendidas seja de 60%. Consideram também 2 portos de destino para petróleo e 3 tipos de produtos.

A Instância 1 considera as plataformas que ficam na área do estado do Espírito Santo e possui 13 atendimentos. A Instância 2 é uma instância maior que considera as plataformas que ficam na área norte do estado do Rio de Janeiro e possui 20 atendimentos. Já a Instância 3 considera os atendimentos da Instância 1 e da Instância 2 e possui 33 atendimentos. A Instância 1 considera 5 navios heterogêneos, a Instância 2 considera 6 navios heterogêneos e a Instância 3 considera 10 navios heterogêneos.

O Grupo 1 é composto por 6 instâncias para analisar o impacto de utilizar navios com menos porções. Na Instância 4, 6 e 8 foram considerados 3 porções. Já na Instância 5, 7 e 9 foram considerados apenas 1 porção, isso é, o planejamento é realizado sem considerar a capacidade em cada porção.

O Grupo 2 é composto por 4 instâncias para analisar o impacto da redução do número de portos disponíveis devido a futuros projetos de desinvestimento da empresa. Nessas instâncias foi desconsiderado o número máximo de navios que cada porto poderia receber no período de planejamento. A Instâncias 10 e a Instância 12 consideram apenas o Porto 1. A Instância 11 e a Instância 13 consideram apenas o Porto 2.

O Grupo 3 é composto por 4 instâncias para avaliar o impacto da diminuição dos tipos de produtos devido a projetos de modernização das refinarias brasileiras, os portos poderiam misturar o petróleo oriundo das plataformas selecionadas. A Instância 14 e a Instância 16 consideram 2 produtos e a Instância 15 e 17 consideram que todos os produtos podem ser misturados.

O Grupo 4 é composto por 5 instâncias para avaliar o impacto de retirar restrições de acesso dos navios às plataformas devido a obras de modernização dos sistemas de produção ou mudanças dos tipos de navios. A Instância 18 e a Instância 21 consideram os 3 tipos de navio. A Instância 19 e a Instância 22 consideram apenas o maior tipo de navio entre os três utilizado, o tipo 1, navio de capacidade máxima de 168 mil m³ de petróleo. Já a Instância 20 considera apenas os navios menores, de tipo 2, navios de capacidade máxima de 100 mil m³ de petróleo.

O Grupo 5 é composto por 4 instâncias para avaliar o impacto da inclusão de restrição de acesso de navios aos portos. A Instância 23 e a Instância 25 consideram que existe restrição de acesso do navio do tipo 1 ao Porto 1. A Instância 24 e a Instância 26 consideram que existe restrição de acesso do navio do tipo 1 ao Porto 2.

O Grupo 6 é composto por 7 instâncias para avaliar o impacto da alteração da limitação de carga a bordo do navio para que uma plataforma seja atendida. A Instância 27, a Instância 30 e a Instância 33 consideram que não existe limitação de carga a bordo do navio para que uma plataforma seja atendida. A Instância 28 e a Instância 31 consideram que a limitação de carga a bordo do navio para que uma plataforma seja atendida seja de 50%. E para a Instância 29 e para a Instância 32 é considerado que a limitação de carga a bordo do navio para que uma plataforma seja atendida seja de 40%.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Os testes computacionais foram executados em um computador com processador Intel Xeon Silver 4116, 2.10 GHz, dois processadores, com 128 GB de memória RAM, utilizando o solver CPLEX 12.10. Foi definido um tempo máximo de processamento de 86.400 segundos (24 horas) para as Instâncias 3, 8, 9 e 33, as instâncias maiores. Para as outras instâncias foi definido um tempo máximo de processamento de 21.600 segundos (6 horas).

A Tabela 4 apresenta os resultados alcançados pelo CPLEX. A primeira coluna representa o grupo de instâncias e a segunda coluna as instâncias testadas. A terceira coluna representa a função objetivo (FO), a quarta coluna representa o *Upper Bound* (UB), a quinta coluna representa o *Lower Bound* (LB) e a sexta coluna representa *gap* ($gap = (UB - LB)/UB$) obtidos do CPLEX. A sétima coluna apresenta o tempo de execução do CPLEX.

Todas as instâncias com 13 atendimentos, Instâncias 1, 4, 5, 10, 11, 14, 15, 18, 19, 20, 23, 24, 27, 28 e 29, não apresentaram *gaps*. Entretanto, nos problemas maiores foi verificado a ocorrência de *gaps* em quase todas as instâncias. Dentre as instâncias com 20 atendimentos, apenas as instâncias 7, 12, 13 e 32 não apresentaram *gaps*, as instâncias 2, 6, 16, 17, 21, 22, 25, 26, 30 e 31 apresentaram *gaps*. E todas as instâncias com 33 atendimentos, instâncias 3, 8, 9 e 33 apresentaram *gaps*.

Tabela 4: Resultados obtidos pelo CPLEX para as instâncias

Grupo	Instância	FO	UB	LB	Gap (%)	Tempo (s)
Grupo 0	1	2.867.923,80	2.867.923,80	2.867.923,80	0,00	70,78
	2	3.700.593,80	3.700.593,80	3.680.025,91	0,56	21.600,00
	3	6.683.230,10	6.683.230,10	3.448.698,52	48,40	86.400,00
Grupo 1	4	3.035.219,80	3.035.219,80	3.035.219,80	0,00	174,66
	5	3.715.227,90	3.715.227,90	3.715.227,90	0,00	14,81
	6	3.701.149,50	3.701.149,50	2.801.802,38	24,30	21.600,00
	7	3.708.622,70	3.708.622,70	3.708.622,70	0,00	1.895,70
	8	6.022.657,20	6.022.657,20	4.410.305,24	27,00	86.400,00
	9	5.818.457,30	5.818.457,30	4.579.072,61	21,00	86.400,00
Grupo 2	10	2.863.842,70	2.863.842,70	2.863.842,70	0,00	34,39
	11	3.039.434,40	3.039.434,40	3.039.434,40	0,00	59,39
	12	3.043.021,90	3.043.021,90	3.043.021,90	0,00	7.871,26
Grupo 3	13	3.051.910,10	3.051.910,10	3.051.910,10	0,00	4.460,58
	14	2.867.922,80	2.867.922,80	2.867.922,80	0,00	54,34
	15	2.867.922,80	2.867.922,80	2.867.922,80	0,00	53,92
	16	3.695.887,50	3.695.887,50	3.672.604,45	0,63	21.600,00
Grupo 4	17	3.543.061,40	3.543.061,40	2.805.318,53	20,82	21.600,00
	18	2.821.189,10	2.821.189,10	2.821.189,10	0,00	520,74
	19	3.209.380,50	3.209.380,50	3.197.403,46	0,37	21.600,00
	20	3.593.520,00	3.593.520,00	3.593.520,00	0,00	1.316,98
	21	3.541.705,80	3.541.705,80	2.789.516,20	21,24	21.600,00
	22	3.260.115,90	3.260.115,90	3.211.033,03	1,51	21.600,00
Grupo 5	23	2.870.528,50	2.870.528,50	2.870.528,50	0,00	66,42
	24	2.867.923,80	2.867.923,80	2.867.923,80	0,00	58,30
	25	3.701.323,70	3.701.323,70	3.693.395,78	0,21	21.600,00
	26	3.699.929,60	3.699.929,60	3.684.037,31	0,43	21.600,00
Grupo 6	27	2.867.923,80	2.867.923,80	2.867.923,80	0,00	78,84
	28	3.041.507,30	3.041.507,30	3.041.507,30	0,00	109,95
	29	3.716.475,00	3.716.475,00	3.716.475,00	0,00	44,66
	30	3.697.752,30	3.697.752,30	3.675.009,59	0,62	21.600,00
	31	3.699.950,60	3.699.950,60	3.684.529,80	0,42	21.600,00
	32	3.712.296,10	3.712.296,10	3.712.296,10	0,00	5.059,66
	33	6.685.538,10	6.685.538,10	4.722.630,48	29,36	86.400,00

Como um exemplo para entender o resultado do CPLEX, a Tabela 5 mostra as viagens geradas na Instância 1 para cada navio. Todas as restrições descritas no Capítulo 4 foram atendidas. As viagens de todos os navios começaram e terminaram em um porto. Todos os atendimentos foram supridos por apenas um navio. Na segunda viagem e na terceira viagem os navios sempre começavam suas

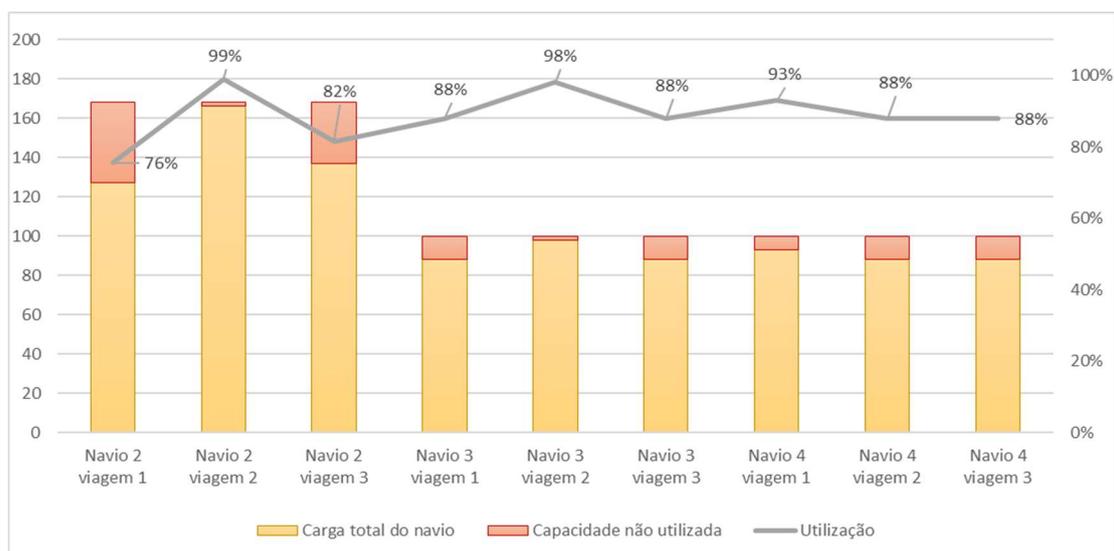
viagens no mesmo porto onde terminaram na viagem anterior. Na Instância 1 foram usados 3 navios, um de 168 mil m³, Navio 2, e dois de 100 mil m³, Navio 3 e Navio 4. Os três navios realizaram três viagens cada um, o máximo de viagens possíveis.

Tabela 5: Viagens geradas na Instância 1

Navio	Planejamento da 1ª viagem	Planejamento da 2ª viagem	Planejamento da 3ª viagem
1	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado
2	Porto 1 → 14 → 2 → Porto 1	Porto 1 → 3 → 4 → Porto 1	Porto 1 → 5 → 7 → Porto 2
3	Porto 2 → 10 → Porto 1	Porto 1 → 9 → Porto 1	Porto 1 → 11 → Porto 2
4	Porto 2 → 1 → 6 → Porto 1	Porto 1 → 12 → Porto 1	Porto 1 → 8 → Porto 2
5	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado

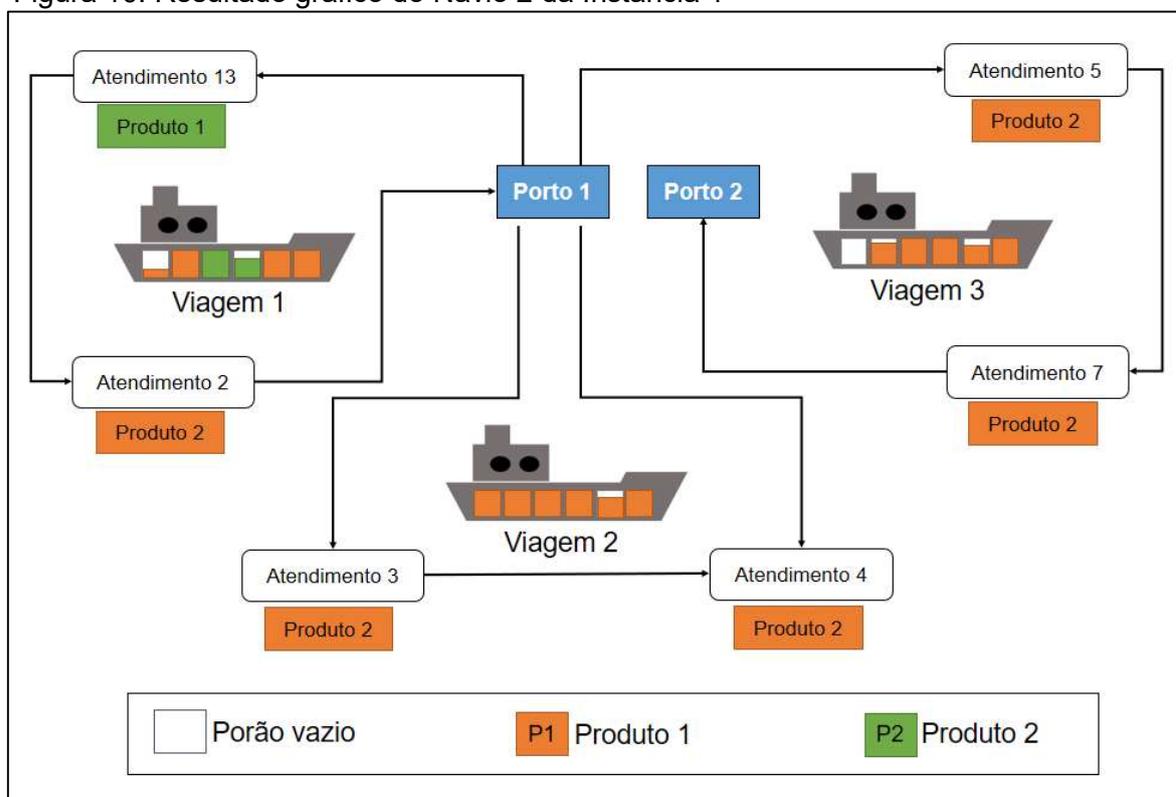
O Navio 2, apresentado na segunda linha da Tabela 5, terminou sua primeira viagem no Porto 1 para descarregar 127 mil m³, no fim da segunda viagem descarregou 166 mil m³ no Porto 1 e no fim da terceira viagem descarregou 137 mil m³ no Porto 2. O Navio 3, apresentado na terceira linha da Tabela 5, descarregou 88 mil m³ no Porto 1 no fim da primeira viagem, descarregou 98 mil m³ no Porto 1 no fim da segunda viagem e descarregou 88 mil m³ no Porto 2 ao fim da terceira viagem. Já o Navio 4, apresentado na quarta linha da Tabela 5, descarregou 93 mil m³ no Porto 1 no fim da primeira viagem, descarregou 88 mil m³ no Porto 1 no fim da segunda viagem e descarregou 88 mil m³ no Porto 2 no fim da terceira viagem. É possível ver na Figura 9 que a capacidade de todos os navios utilizados na Instância 1 ficou acima de 75% em cada viagem.

Figura 9: Capacidade dos navios utilizados na Instância 1



A Figura 10 mostra a representação esquemática das viagens do Navio 2 da Instância 1. É importante destacar que o modelo matemático proposto controla a quantidade total de petróleo em cada compartimento para que a capacidade máxima não seja excedida durante a viagem. Além disso, o modelo não permite que em algum momento ocorra a mistura de petróleos diferentes dentro do mesmo porão.

Figura 10: Resultado gráfico do Navio 2 da Instância 1



Na Figura 10 cada navio possui seis porões que são representados pela cor branca quando não estão preenchidos. O Navio 2 em sua primeira viagem, apresentada na segunda linha e na segunda coluna da Tabela 5, parte do Porto 1 em direção ao Atendimento 13 recolhendo o Produto 1, representado pela cor verde, e armazena esse produto nos porões 3 e 4. Em seguida recolhe o Produto 2, representado pela cor laranja, do Atendimento 2 e armazena o produto nos porões 1, 2, 5 e 6. Os dois produtos são descarregados no Porto 1. Em seguida é iniciada a Viagem 2 do mesmo navio, apresentada na segunda linha e na terceira coluna da Tabela 5. O navio recolhe o Produto 2 do Atendimentos 3, armazenando o produto nos porões

1, 2, 5 e 6. Em seguida recolhe o Produto 2 do Atendimentos 4 armazenando o produto nos porões 1, 3 e 4, retornando em seguida ao Porto 1. Como o produto é o mesmo nos Atendimentos 2 e 3 ele pode ser misturado no porão 1. Após descarregar o produto o navio parte para sua terceira viagem, apresentada na segunda linha e na quarta coluna da Tabela 5, recolhendo o Produto 2 do atendimento 5 e armazenando o produto nos porões 2, 4 e 6. Em seguida recolhe o Produto 2 do Atendimentos 7 e armazena o mesmo nos porões 3, 5 e 6. E em seguida o produto é descarregado no Porto 2.

A Tabela 6 e a Tabela 7 mostram, respectivamente, as viagens geradas na Instância 2 e na Instância 3 para cada navio.

Tabela 6: Viagens geradas na Instância 2

Navio	Planejamento da 1ª viagem	Planejamento da 2ª viagem	Planejamento da 3ª viagem
1	Porto 1 → 7 → 2 → Porto 1	Porto 1 → 9 → 8 → 10 → Porto 1	Porto 1 → 1 → 19 → Porto 2
2	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado
3	Porto 1 → 3 → 4 → Porto 1	Porto 1 → 5 → 6 → Porto 1	Não utilizado
4	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado
5	Porto 1 → 11 → Porto 1	Porto 1 → 13 → Porto 1	Porto 1 → 15 → 16 → 20 → Porto 2
6	Porto 1 → 12 → 14 → Porto 2	Porto 2 → 17 → 18 → Porto 2	Não utilizado

Tabela 7: Viagens geradas na Instância 3

Navio	Planejamento da 1ª viagem	Planejamento da 2ª viagem	Planejamento da 3ª viagem
1	Porto 1 → 13 → 10 → Porto 1	Porto 1 → 3 → 5 → Porto 1	Porto 1 → 18 → 19 → 12 → Porto 1
2	Porto 1 → 20 → 15 → Porto 1	Porto 1 → 16 → 21 → Porto 1	Porto 1 → 7 → 8 → Porto 1
3	Porto 2 → 2 → 4 → Porto 1	Porto 1 → 22 → 17 → 11 → Porto 1	Não utilizado
4	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado
5	Porto 1 → 23 → 6 → Porto 1	Não utilizado	Não utilizado
6	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado
7	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado
8	Porto 1 → 1 → 9 → Porto 1	Porto 1 → 28 → 33 → 32 → Porto 2	Não utilizado
9	Porto 1 → 24 → Porto 1	Porto 1 → 27 → 30 → Porto 1	Porto 1 → 14 → Porto 1
10	Porto 1 → 25 → Porto 1	Porto 1 → 26 → Porto 1	Porto 1 → 29 → 31 → Porto 2

A Instância 2 foi proposta com 20 atendimentos e na Instância 3 com 33 atendimento, e todos os atendimentos foram tratados. O modelo demonstrou boa flexibilidade usando navios para 1, 2 ou 3 viagens e cada viagem. Assim como na Instância 1, todas as restrições definidas para o problema foram atendidas nas instâncias 2 e 3. Na instância 2 foram utilizados 4 navios e na Instância 3 foram utilizados sete navios.

A Tabela 8 apresenta os resultados operacionais das instâncias propostas para avaliar os impactos das modificações entre elas, conforme descrito na Tabela 3 do capítulo anterior. A primeira coluna representa o grupo de instâncias e a segunda coluna as instâncias testadas. A terceira, quarta e quinta colunas apresentam a quantidade de navios utilizados por tipo de navio e a sexta coluna apresenta a quantidade total de navios utilizados. A sétima coluna apresenta a distância total navegada por todos os navios na instância. A oitava coluna apresenta o custo fixo calculado em função do uso dos navios. A nona coluna apresenta o custo variável total da instância, calculado em função do custo da distância navegada e do custo de deslocamento de cada navio. Por fim, a décima coluna apresenta a soma do custo variável com o custo fixo.

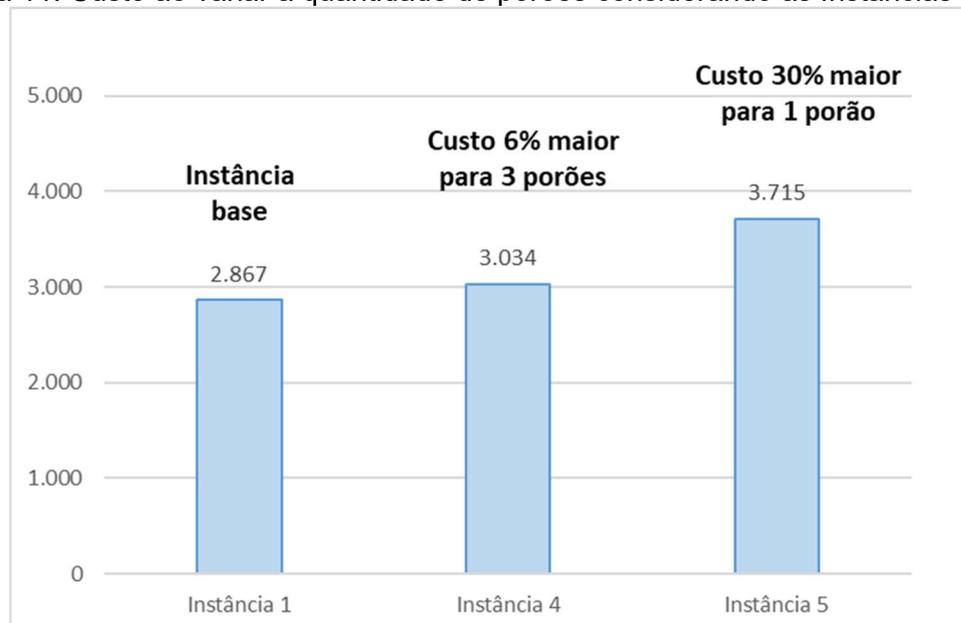
No Grupo 1, a Instância 4, que considerou navios com apenas 3 porões, apresentou custos fixos maiores com relação a Instância 1, que considerava 6 porões. Foi necessário utilizar navios maiores para manter a segregação dos tipos de produtos. Já a Instância 5, que considerava apenas 1 porão por navio, apresentou, além de custos fixos maiores, custos variáveis e distâncias navegadas maiores com relação a Instância 1. Isso indica que considerar múltiplos porões no problema em estudo melhora o resultado operacional, conforme esperado.

Tabela 8: Análises dos resultados operacionais mais relevantes

Grupo	Instância	Navios utilizados				Distância navegada (km)	Custo		
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Total		fixo total (US\$)	variável total (US\$)	total (US\$)
0	1	1	2	0	3	7.481,00	2.814.800,00	52.367,00	2.867.167,00
	2	1	1	2	4	12.581,00	3.620.800,00	80.282,00	3.701.082,00
	3	3	1	3	7	14.789,00	6.609.200,00	92.594,00	6.701.794,00
1	4	2	1	0	3	6.510,00	2.988.400,00	45.570,00	3.033.970,00
	5	1	2	1	4	8.407,00	3.658.000,00	56.904,00	3.714.904,00
	6	2	1	2	5	13.030,00	3.620.800,00	81.769,00	3.702.569,00
	7	1	1	2	4	13.879,00	3.620.800,00	88.598,00	3.709.398,00
	8	4	0	2	6	18.326,00	5.939.600,00	116.762,00	6.056.362,00
	9	3	0	3	6	20.672,00	5.728.800,00	125.324,00	5.854.124,00
2	10	1	2	0	3	6.903,00	2.814.800,00	48.321,00	2.863.121,00
	11	2	1	0	3	7.089,00	2.988.400,00	49.623,00	3.038.023,00
	12	2	0	1	3	13.663,00	2.951.200,00	90.327,00	3.041.527,00
	13	2	0	1	3	14.957,00	2.951.200,00	99.013,00	3.050.213,00
3	14	1	1	1	3	7.481,00	2.814.800,00	52.367,00	2.867.167,00
	15	1	2	0	3	7.481,00	2.814.800,00	52.367,00	2.867.167,00
	16	1	1	2	4	12.234,00	3.620.800,00	76.263,00	3.697.063,00
	17	0	2	2	4	15.431,00	3.447.200,00	97.834,00	3.545.034,00
4	18	1	1	1	3	6.621,00	2.777.600,00	43.637,00	2.821.237,00
	19	3	0	0	3	6.485,00	3.162.000,00	45.395,00	3.207.395,00
	20	4	0	0	4	10.265,00	3.521.600,00	71.855,00	3.593.455,00
	21	0	2	2	4	14.708,00	3.447.200,00	95.860,00	3.543.060,00
	22	3	0	0	3	13.433,00	3.162.000,00	94.031,00	3.256.031,00
5	23	1	2	0	3	7.833,00	2.814.800,00	54.831,00	2.869.631,00
	24	1	2	0	3	7.598,00	2.814.800,00	53.186,00	2.867.986,00
	25	1	1	2	4	12.684,00	3.620.800,00	81.136,00	3.701.936,00
	26	1	1	2	4	12.529,00	3.620.800,00	79.778,00	3.700.578,00
6	27	1	2	0	3	7.481,00	2.814.800,00	52.367,00	2.867.167,00
	28	2	1	0	3	7.369,00	2.988.400,00	51.583,00	3.039.983,00
	29	1	2	1	4	8.456,00	3.658.000,00	57.966,00	3.715.966,00
	30	1	1	2	4	12.595,00	3.620.800,00	78.419,00	3.699.219,00
	31	1	1	2	4	12.616,00	3.620.800,00	80.090,00	3.700.890,00
	32	1	1	2	4	14.600,00	3.620.800,00	92.693,00	3.713.493,00
	33	3	1	3	7	18.360,00	6.609.200,00	112.036,00	6.721.236,00

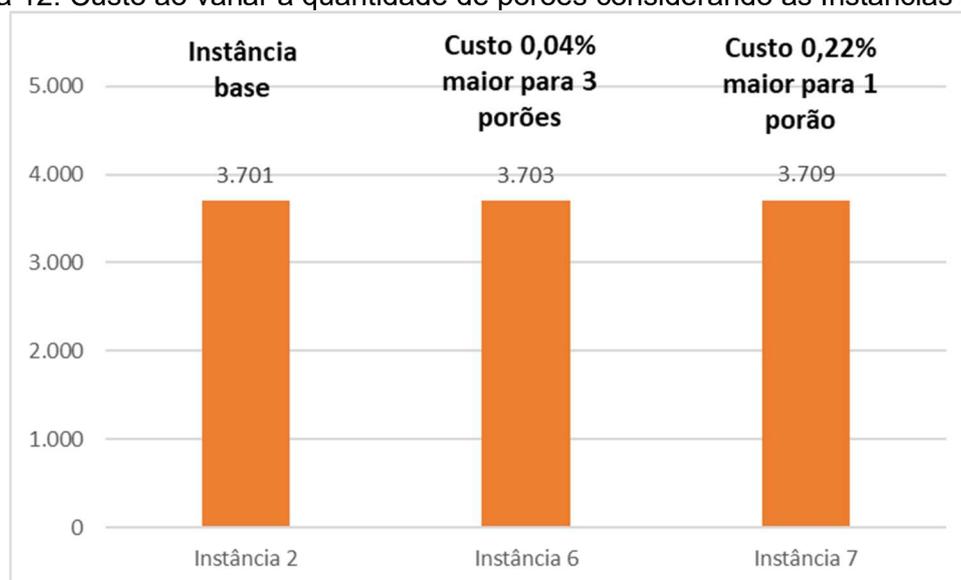
A Figura 11 apresenta a variação no custo total de transportes ao considerar a diminuição da quantidade de porões das instâncias com 13 atendimentos.

Figura 11: Custo ao variar a quantidade de porões considerando as Instâncias 1, 4 e 5



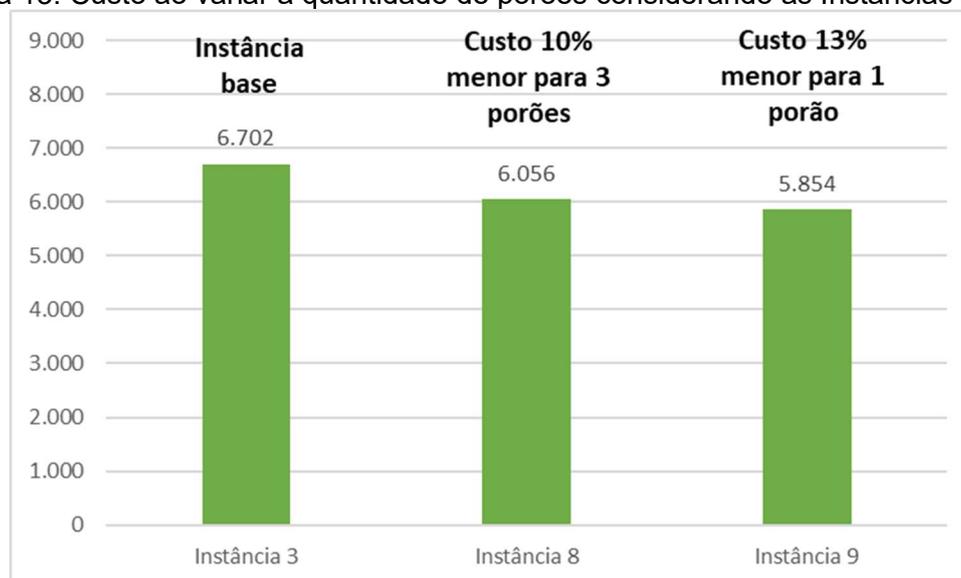
A Figura 12 apresenta a variação no custo total de transporte ao considerar a diminuição da quantidade de porões dos navios das instâncias com 20 atendimentos. A Instância 6, que considerava 6 porões, e a Instância 7, que considerava 1 porão, não apresentaram resultados com diferenças significativas com relação aos apresentados na Instância 2, que considerava 6 porões. Logo, a diminuição de porões não indica melhorias operacionais significativas em instâncias médias. Um dos motivos para isso é que em instancias maiores já são necessárias mais viagens para transportar os produtos, e as cargas podem ser programadas de forma que em cada viagem um navio só leve um tipo de produto. O impacto da alteração seria maior se os períodos pré-definidos para coleta dos atendimentos, as janelas de tempo, fossem menores. O impacto da alteração também seria maior e se tivesse mais tipos de produtos na mesma instância, o que obrigaria a ter mais navios para atender as restrições de menos porões no planejamento.

Figura 12: Custo ao variar a quantidade de porões considerando as Instâncias 2, 6 e 7



A Figura 13 apresenta a variação no custo total de transportes ao considerar a diminuição da quantidade de porões dos navios das instâncias grandes, com 33 atendimentos.

Figura 13: Custo ao variar a quantidade de porões considerando as Instâncias 3, 8 e 9

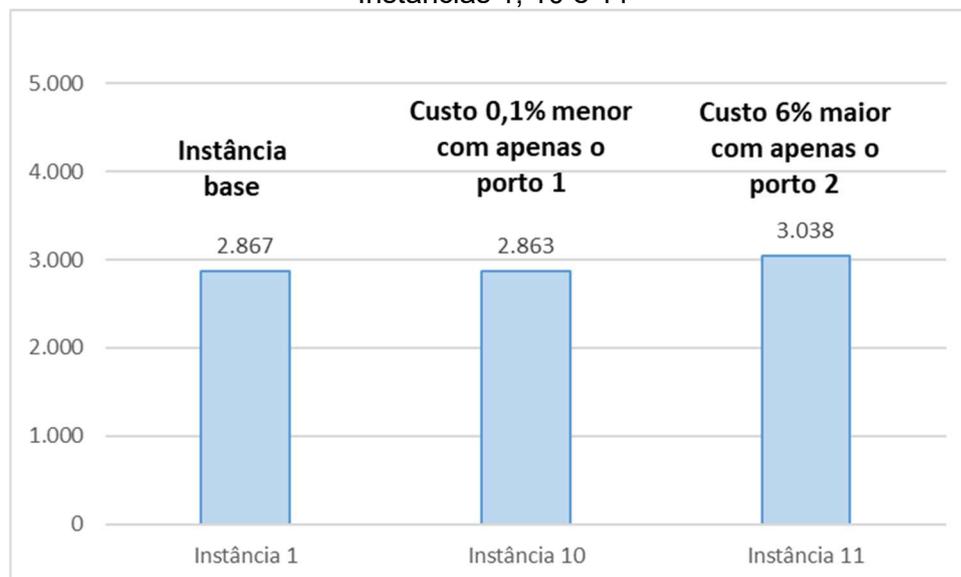


A Instância 8, que considerava 6 porões, e a Instância 9, que considerava 1 porão, não apresentaram reduções no custo total com relação aos apresentados na Instância 3, que considerava 6 porões. Isso poderia indicar que em instâncias grandes, o aumento da quantidade de porões nos navios leva ao aumento de custos. Entretanto, como o *gap* da Instância 3 foi alto, 48%, é possível que o

resultado encontrado não seja o melhor e existam outros resultados de menor custo. O mesmo poderia ocorrer com as instâncias 8 e 9 que apresentaram *gap* de 27% e 21%, respectivamente.

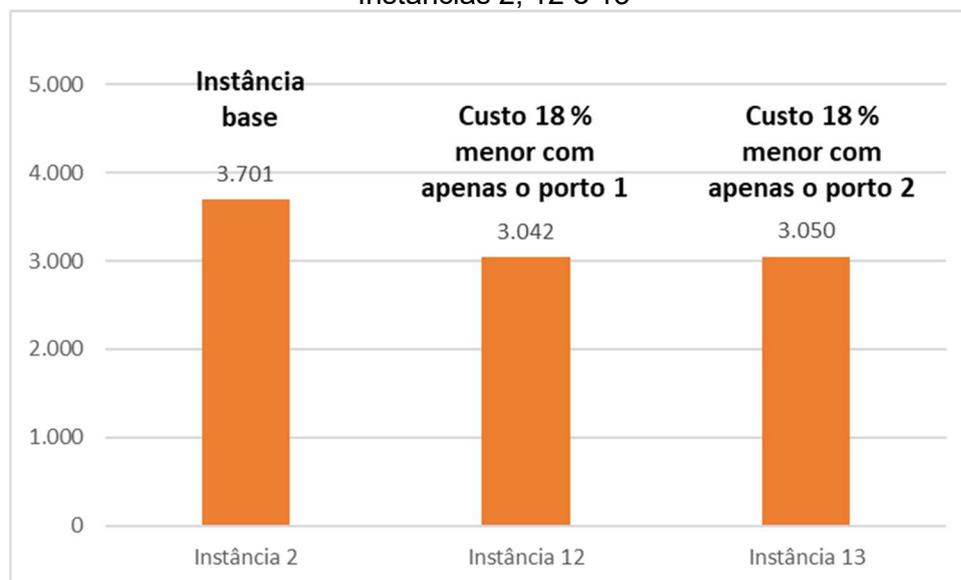
As instâncias do Grupo 2 tinham por objetivo analisar o impacto da redução do número de portos disponíveis. A Figura 14 apresenta a variação do custo ao ter apenas um porto disponível nas instâncias com treze atendimentos. Ao utilizar apenas o porto 1 na Instância 10 o custo variável do transporte diminuiu em apenas 0,1%. Já ao utilizar apenas o porto 2 na Instância 11 o custo variável do transporte aumentou em 6%. Isso se deve a localização do Porto 1, mais próximo das plataformas que deveriam ser atendidas nessas instâncias. Essas informações sinalizam que, ao ter que escolher entre os dois portos para atender o grupo de plataformas, o porto 1 é a melhor opção considerando o custo de transporte.

Figura 14: Variação do custo ao ter apenas um porto disponível considerando as Instâncias 1, 10 e 11



A Figura 15 apresenta a variação do custo ao ter apenas um porto disponível nas instâncias com vinte atendimentos. Ao utilizar apenas o porto 1 na Instância 12 ou apenas o porto 2 na Instância 13 o custo variável do transporte diminuiu em 18%. Essas informações sinalizam que, ao ter que escolher entre os dois portos para atender o grupo de plataformas, a escolha é indiferente considerando o custo de transporte. Isso se deve a localização dos dois portos, entre as plataformas que deveriam ser atendidas nessas instâncias.

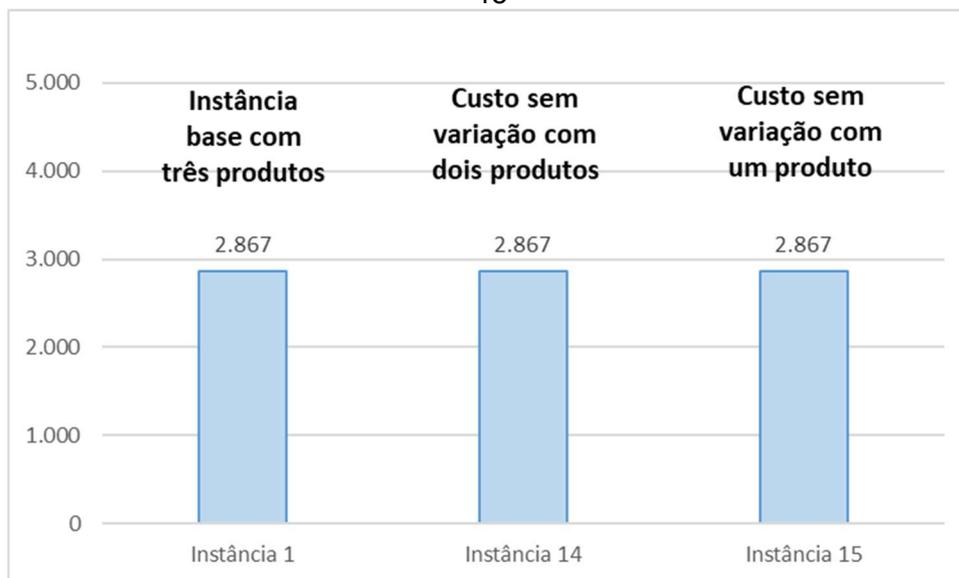
Figura 15: Variação do custo ao ter apenas um porto disponível considerando as Instâncias 2, 12 e 13



Não foi considerado nas análises das instâncias do Grupo 2 o custo do investimento já realizado e o custo para desmobilizar a instalação. Para a desmobilização seria necessário fazer um planejamento considerando também estudos financeiros de longo prazo, aspectos legais relacionados ao uso dos portos, impactos sociais da desmobilização e outros estudos além do apresentado nesse modelo. Seriam necessárias outras análises gerenciais para a tomada de decisão.

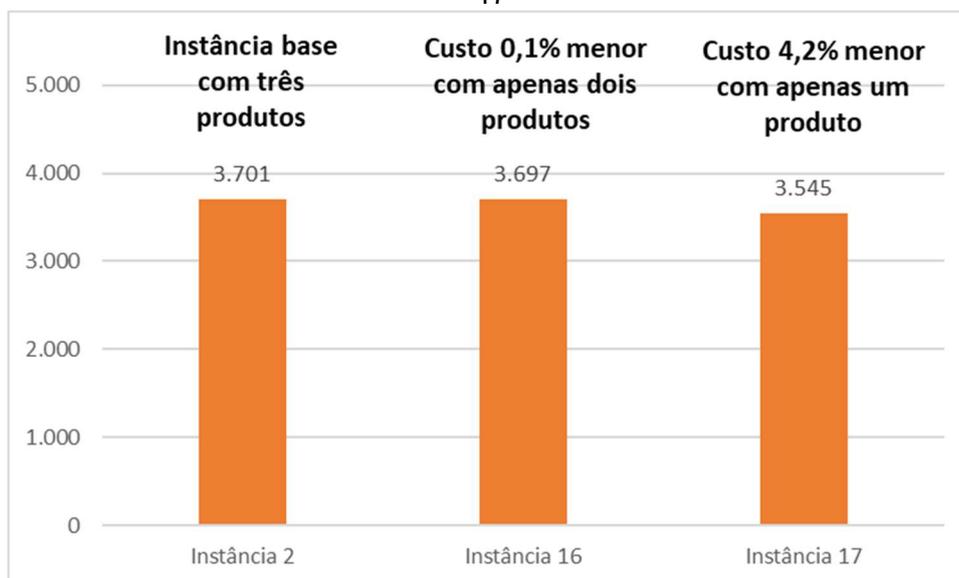
As instâncias do Grupo 3 tinham o objetivo de avaliar o impacto da diminuição dos tipos de produto, que nas instâncias base eram 3 produtos. A Figura 16 mostra que ao reduzir a quantidade de produtos das instâncias com treze atendimentos não há redução nos custos.

Figura 16: Custo ao reduzir a quantidade de produtos considerando as Instâncias 1, 14 e 15



Entretanto a Figura 17 mostra que nas instâncias com vinte atendimentos ao reduzir para 2 produtos os custos totais caem 0,1% (Instância 16) e ao reduzir para 1 produto os custos caem 4,2% (Instância 17).

Figura 17: Custo ao reduzir a quantidade de produtos considerando as Instâncias 2, 16 e 17

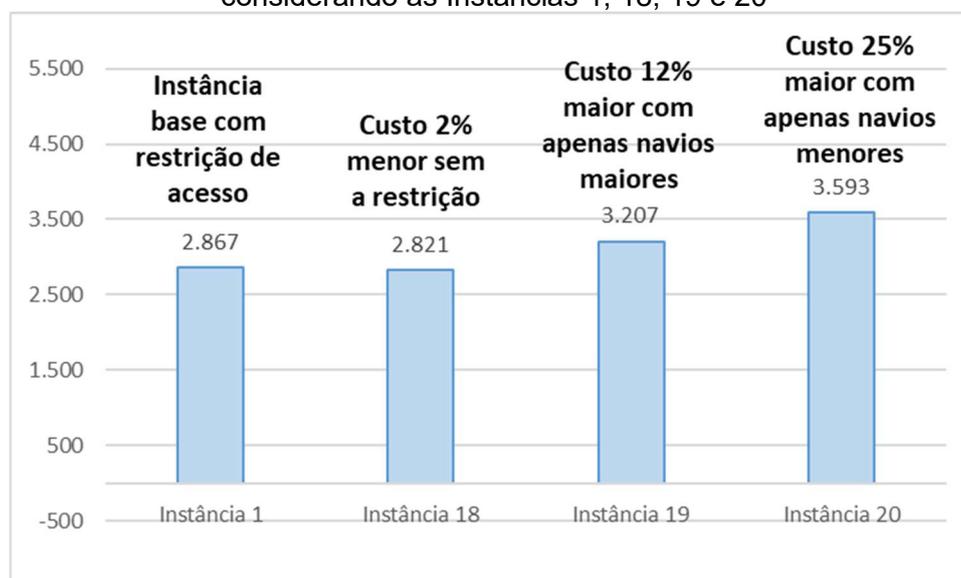


A redução de custos da Instância 16 se deve a diminuição da distância navegada devido a maior possibilidade de misturar petróleo de diferentes atendimentos em uma mesma viagem. Já a redução maior de custos da Instância 17 se deve a troca de um dos navios maiores por um navio menor e mais barato, já que seria possível

misturar o petróleo de todas as plataformas. Esse resultado indica que projetos de modernização das refinarias brasileiras, podendo misturar os petróleos de mais plataformas da empresa, podem trazer reduções nos custos de transporte se abranger muitas plataformas.

As instâncias do Grupo 4 tinham o objetivo de avaliar o impacto de retirar as restrições de acesso dos navios às plataformas. A Figura 18 apresenta a variação de custo das instâncias com treze atendimentos ao retirar essa restrição.

Figura 18: Variação de custo ao retirar as restrições de acesso de navios às plataformas considerando as Instâncias 1, 18, 19 e 20

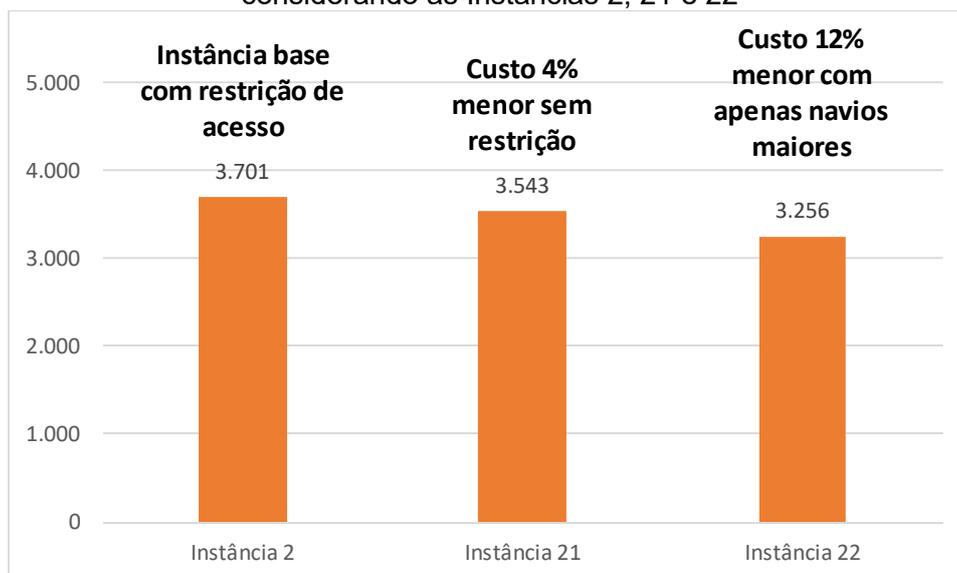


Na Instância 18 o custo de transporte, em relação à Instância 1, diminuiu em 2% pois foi possível selecionar um dos navios menores e diminuir a distância navegada. Ao utilizar apenas navios grandes na Instância 19, também sem restrição de acesso dos navios às plataformas, o custo aumentou em 12% em relação à Instância 1 pois o custo fixo dos navios maiores era muito superior. Já ao utilizar apenas navios pequenos na Instância 20, também sem restrição de acesso dos navios às plataformas, o custo aumentou em 25% pois foi necessário mais um navio pequeno para todos os atendimentos, além de ser necessário navegar 37% mais do que na Instância 1. Os resultados da Instância 18 com relação à Instância 20 e à Instância 19 e à Instância 20 foram melhores, o que sinaliza que ter uma

frota de navios de diversas capacidades e custos é mais vantajoso do que ter apenas navios grandes (Instância 19) ou ter apenas navios menores (Instância 20).

A Figura 19 apresenta a variação de custo das instâncias com vinte atendimentos ao retirar as restrições de acesso de navios às plataformas. Ao retirar a restrição de acesso dos navios às plataformas nessa instância maior, Instância 21, o custo de transporte diminuiu em 4% pois foi possível selecionar um dos navios menores. Como o *gap* da Instância 21 foi de 21% é possível que existam resultados de menores custos e que a diferença entre considerar ou não a restrição de acesso de navios às plataformas seja maior, o que indica que não considerar as restrições de acesso pode levar ao planejamento incorreto devido aos custos significativos que essa restrição mostra.

Figura 19: Variação de custo ao retirar as restrições de acesso de navios às plataformas considerando as Instâncias 2, 21 e 22



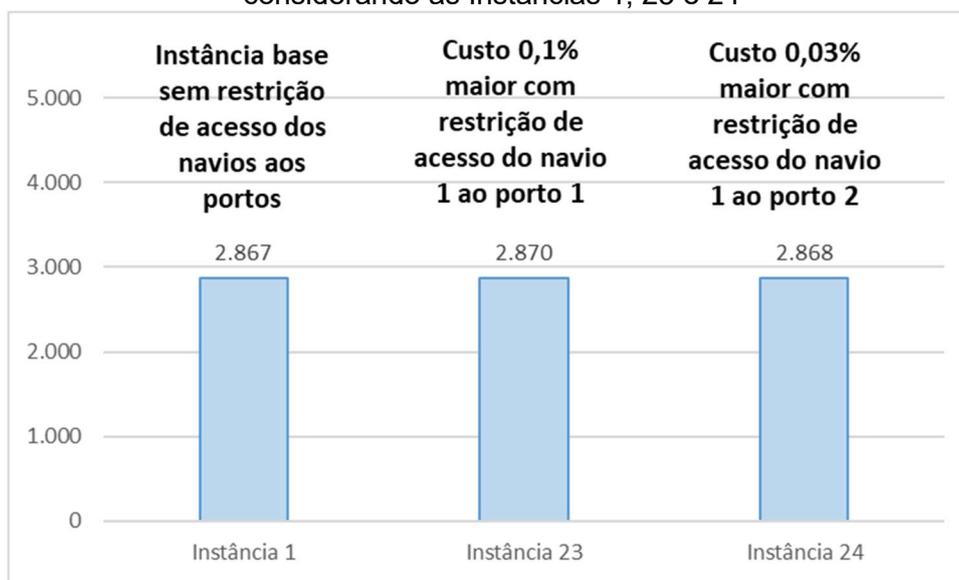
A Instância 22, que além de não considerar a restrição de acesso dos navios às plataformas considera apenas navios grandes, teve o custo 12% menor do a Instância 2. Esse resultado sinaliza que navios maiores, mesmo com custo fixos e variáveis maiores, conseguem atender a uma maior quantidade de atendimentos em uma viagem nas instâncias de 20 atendimento, o que leva a ter uma menor distância navegada e uso de menos navios. Como a distância entre as plataformas

não é muito grande os navios maiores conseguem coletar petróleo de mais plataformas antes de descarregar os produtos nos portos.

Vale comentar que a eliminação da restrição de acesso seria custosa pois dependeria de grandes investimentos de infraestrutura para modernização das plataformas. A eliminação da restrição de acesso também poderia ocorrer com a troca da frota de navios, o que envolveria grandes mudanças contratuais que também poderiam levar ao aumento de custos fixos.

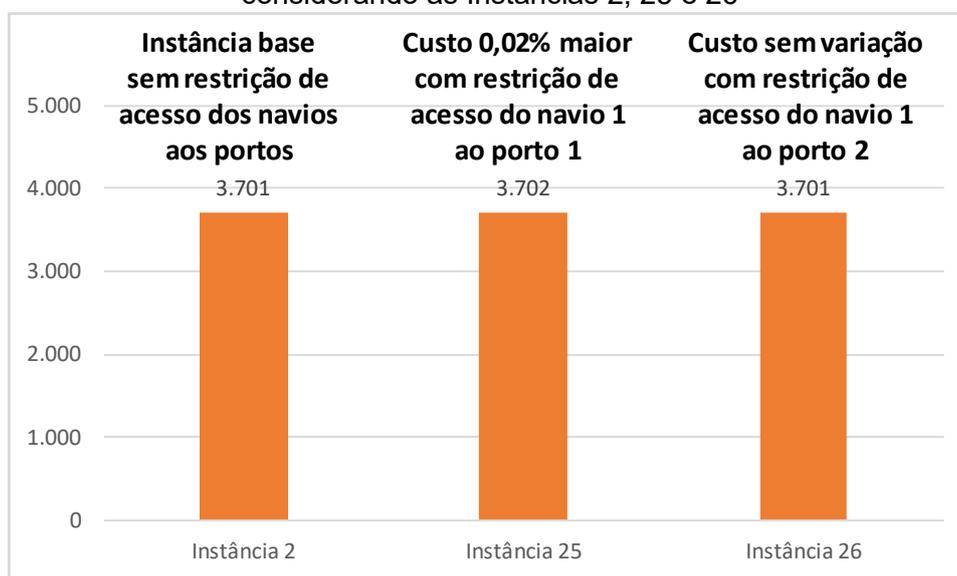
As instâncias do Grupo 5 tinham o objetivo de avaliar o impacto de incluir a restrição de acesso de navios aos portos. A Figura 20 apresenta a variação de custo das instâncias com treze atendimentos ao incluir a restrição de acesso de navios aos portos. Ao incluir a restrição de acesso do navio 1 ao porto 1, na Instância 23, o custo calculado foi 0,1% maior pois a distância navegada aumentou em 5%. Já ao incluir a restrição de acesso do navio 1 ao porto 2, na Instância 24, o custo calculado não sofreu variação significativa pois a distância navegada aumentou apenas 1,6%. Esses resultados indicam que adicionar restrições de acesso apenas ao navio tipo 1 a um porto não geram impactos significativos, isso ocorre pois não são necessárias muitas mudanças nas viagens para atender às restrições.

Figura 20: Variação de custo ao incluir as restrições de acesso de navios aos portos das considerando as Instâncias 1, 23 e 24



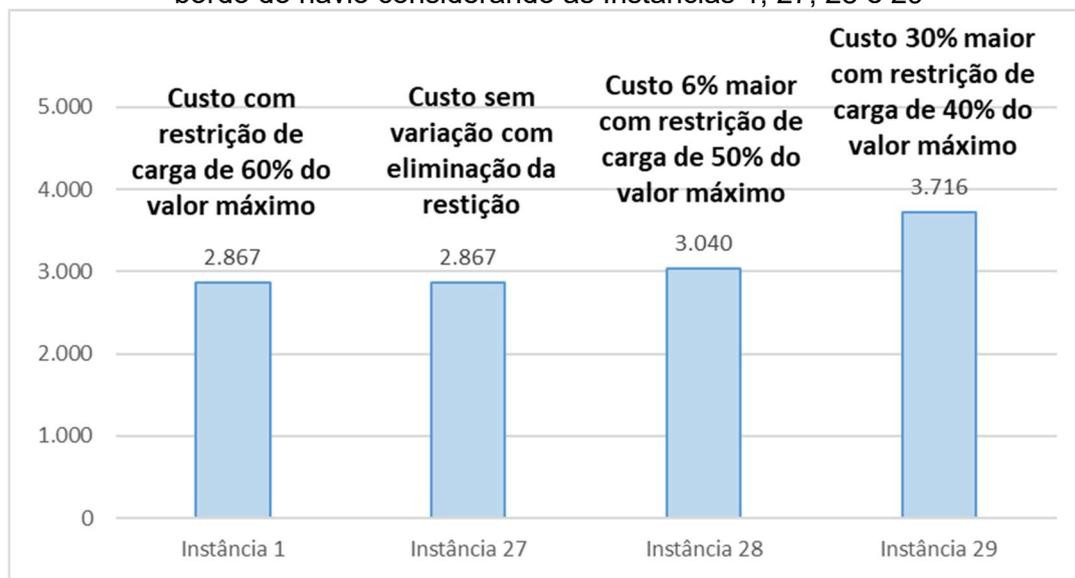
A Figura 21 apresenta a variação de custo das instâncias com vinte atendimentos ao incluir a restrição de acesso de navios aos portos. Ao incluir a restrição de acesso do navio 1 ao porto 2, na Instância 25, o custo calculado foi 0,02% maior pois a distância navegada aumentou em pouco menos de 1%. Já ao incluir a restrição de acesso do navio 1 ao porto 1, na Instância 26, o custo calculado praticamente não sofreu variação. Da mesma forma que nas instâncias pequenas, esses resultados indicam que adicionar restrições de acesso apenas ao navio tipo 1 a um porto não geram impactos significativos.

Figura 21: Variação de custo ao incluir as restrições de acesso de navios aos portos considerando as Instâncias 2, 25 e 26



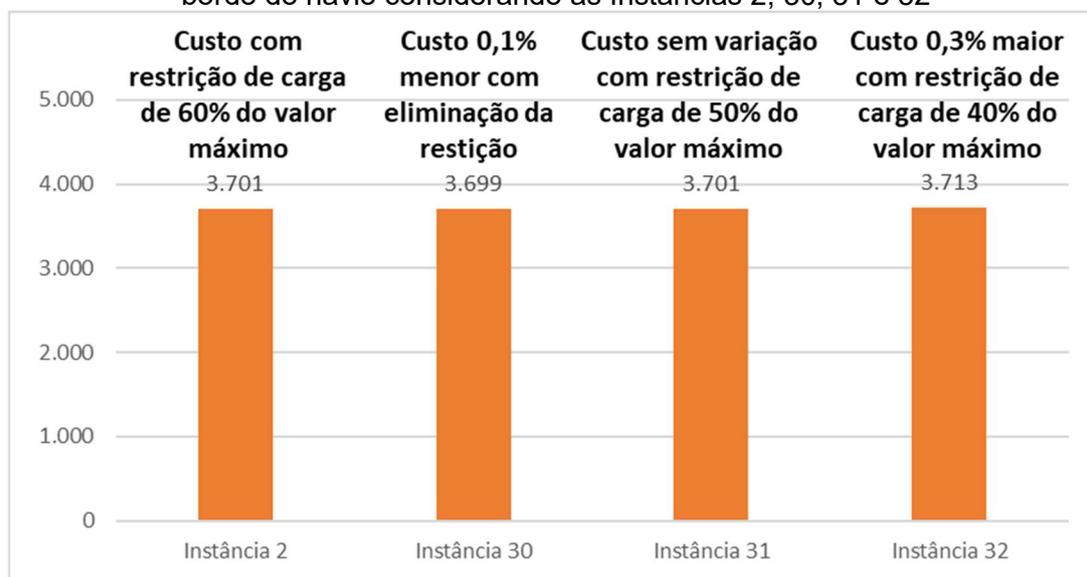
As instâncias do Grupo 6 tinham o objetivo de avaliar o impacto de incluir a restrição de limitação de carga a bordo do navio para atendimento. A Figura 22 apresenta a variação de custo das instâncias com treze atendimentos ao alterar a restrição de acesso por limitação de carga a bordo do navio. Ao eliminar a restrição de carga máxima a bordo de 60% para receber óleo de um atendimento, na Instância 27, não ocorreu variação no custo de transporte. Entretanto, ao aumentar restrição de carga máxima a bordo para 50% (Instância 28) e para 40% (Instância 29) o custo aumentou respectivamente 6% e 30% com relação a Instância 1. Esse resultado sugere que em instâncias pequenas o aumento das restrições de limitação de carga a bordo do navio para atendimento traz grandes impactos no resultado final.

Figura 22: Variação de custo ao alterar a restrição de acesso por limitação de carga a bordo do navio considerando as Instâncias 1, 27, 28 e 29



A Figura 23 apresenta a variação de custo das instâncias com vinte atendimentos ao alterar a restrição de acesso por limitação de carga a bordo do navio.

Figura 23: Variação de custo ao alterar a restrição de acesso por limitação de carga a bordo do navio considerando as Instâncias 2, 30, 31 e 32

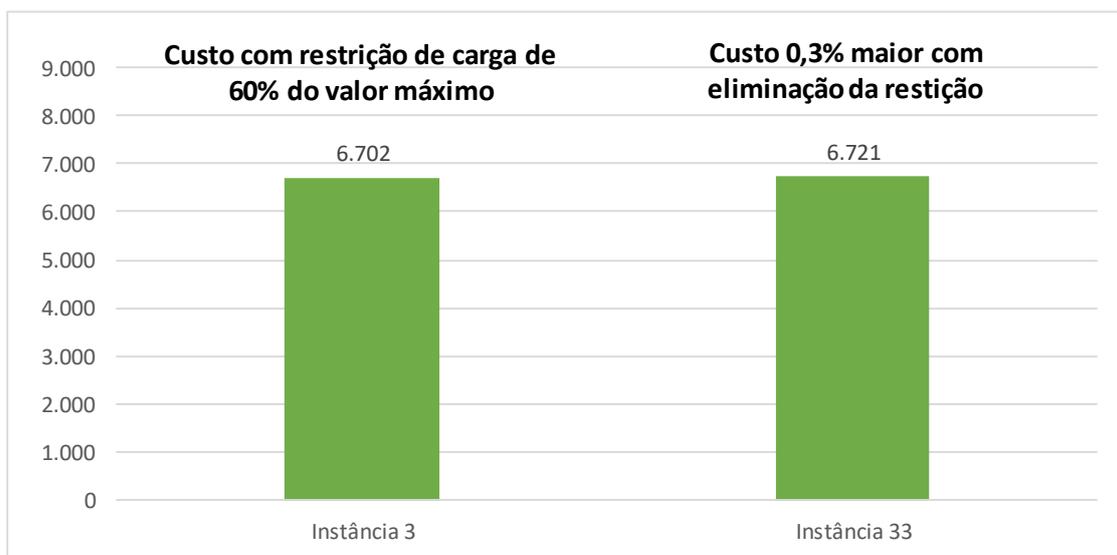


Ao eliminar a restrição de carga máxima a bordo de 60% para receber óleo de um atendimento na Instância 30 não ocorreu variação significativa no custo de transporte. O mesmo ocorreu ao restringir a carga máxima a bordo para 50% (Instância 31) e para 40% (Instância 32). Esses resultados sugerem que em

instâncias maiores o aumento das restrições de limitação de carga a bordo do navio para atendimento não traz grandes impactos no resultado.

A Figura 24 apresenta a variação de custo em instâncias com 33 atendimentos ao alterar a restrição de acesso por limitação de carga a bordo do navio. Ao eliminar a restrição de carga máxima a bordo de 60% para receber óleo de um atendimento não ocorreu variação significativa no custo de transporte. Esse resultado sugere, assim com os resultados das Instâncias 27 e 30, que as restrições de limitação de carga a bordo do navio de até 60 % para conectar em uma plataforma não trazem grandes impactos no resultado. É importante frisar que a empresa deve analisar as restrições de segurança considerando outros fatores além de custo de transporte, como o risco e as consequências de um possível acidente.

Figura 24: Variação de custo ao alterar a restrição de acesso por limitação de carga a bordo do navio considerando as Instâncias 3 e 33



Dentre todas as instâncias, a que mostrou a maior redução de custo foi a Instância 12, que considerou apenas o Porto 1 para 20 atendimentos, que teve um custo 17,82% menor do que a Instância base, a Instância 2. Entretanto, como já afirmado anteriormente, para a desmobilização de um porto seria necessário considerar os impactos da mudança.

Dentre todas as instâncias, a que teve o maior aumento do custo foi a Instância 29, que considerou a restrição de carga de 40% do valor máximo para 13 atendimentos, que teve um custo 29,6% maior do que a Instância base, a Instância 1.

Dentre todas as instâncias, a que conseguiu obter a maior redução da distância percorrida foi a Instância 19, que considerou apenas navios maiores sem restrição de acesso para 13 atendimentos, que teve uma redução de 13,31% em relação a Instância base, a Instância 1. Entretanto, esse resultado é uma análise inicial e carece da análise dos custos e riscos para a eliminação da restrição de acesso.

E dentre todas as instâncias, a que teve o maior aumento da distância percorrida foi a Instância 9, que considerou apenas 1 porão para 33 atendimentos, que teve um aumento 39,78% em relação a Instância base, a Instância 3.

Após observar os resultados obtidos pelo CPLEX, pode-se perceber que o modelo atende as restrições do problema e possibilitava diversas análises, mostrando a viabilidade do modelo. Além disso, vale destacar que o modelo proposto pode ser utilizado por qualquer empresa petrolífera que deseje planejar as viagens dos navios para atender a plataformas.

7 CONCLUSÕES

Essa dissertação tem o objetivo geral de desenvolver um modelo matemático para planejamento das rotas de navios que devem retirar petróleo produzido de plataformas considerando múltiplos compartimentos, múltiplos portos e múltiplas viagens. Pela revisão da literatura constatou-se que nenhum problema de roteamento de veículos abordou simultaneamente todas as restrições do problema, logo o modelo matemático que contemple MCVRP, MTVRP, MDVRP, SDVRP, VRPTW e HFVRP consiste em uma nova contribuição para o meio científico.

Instâncias com dados baseados em informações reais foram resolvidos no solver CPLEX 12.10. Foram obtidas redução do custo total de até 17,82% e diminuição na distância total percorrida pelos navios de até 13,31% em relação a Instância base. Contudo, também se observou a ocorrência de *gaps* em quase todas as instâncias maiores devido à complexidade do problema.

Os resultados mostraram que a utilização do modelo pode ajudar na tomada de decisões gerenciais, a modelagem se mostrou útil para verificar possíveis mudanças no sistema de transporte, como a escolha da frota de navios utilizada ou investimentos no refino de petróleo.

Sugere-se como trabalho futuro o desenvolvimento de um algoritmo computacional para resolver o modelo matemático proposto. Outra sugestão seria a incorporação, não necessariamente ao mesmo tempo, dos seguintes aspectos: uso de estocasticidade na demanda de óleo a ser aliviada das plataformas, variações no tempo de deslocamento em função de mal tempo, inclusão de limites mínimos e máximos de volume de cada produto que deveriam ser recebidos de em cada porto. As análises econômicas e financeiras da redução da quantidade de portos e da eliminação das restrições de acesso também poderiam ser feitas, assim como analisar os aspectos legais e impactos sociais que podem ser gerados.

REFERÊNCIAS

ABDULKADER, M. M.; GAJPAL, Y.; ELMEKKAWY, T. Y. Hybridized ant colony algorithm for the Multi Compartment Vehicle Routing Problem. **Applied Soft Computing**, v.37, p.196-203, 2015.

AIZEMBERG, Luiz *et al.* Formulations for a problem of petroleum transportation. **European Journal of Operational Research**, v. 237, n. 1, p. 82-90, 2014.

ALINAGHIAN, Mahdi; SHOKOUHI, Nadia. Multi-depot multi-compartment vehicle routing problem, solved by a hybrid adaptive large neighborhood search. **Omega**, v. 76, April 2018, Pages 85-99, 2018.

ALLAHYARI, S.; SALARI, M.; VIGO, D. A hybrid metaheuristic algorithm for the multi-depot covering tour vehicle routing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 242, n. 3, p. 756–768, 2015.

ANP, 2019. **Dados estatísticos**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>. Acesso em 01 de dezembro de 2019.

ARPINI, Bianca Passos. **Planejamento da logística de suprimento de plataformas offshore por meio de um modelo matemático 2L-CVRP com frota heterogênea e equilíbrio náutico**. 2015. 164 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Centro de tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

ARPINI, Bianca Passos; ROSA, Rodrigo de Alvarenga. Planejamento da logística de suprimento de plataformas Offshore por meio de um modelo matemático 2L-CVRP com frota heterogênea e equilíbrio náutico. **Transportes** (Rio de Janeiro), v. 23, p. 67, 2015.

ASTOURES, Henrique Fiorot; ROSA, Rodrigo de Alvarenga; SILVA ROSA, André Luís da. Planning the Diesel Supply for Offshore Platforms by a Mathematical Model Based on the Vehicle Routing Problem with Replenishment. **Transportation research procedia**, v. 18, p. 11-18, 2016.

BELFIORE, P.; YOSHIZAKI, H. T. Y. Scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and split deliveries in Brazil. **European Journal of Operational Research**, v. 199, n. 3, p. 750–758, 2009.

BERTAZZIA, Luca; *et al.* A matheuristic algorithm for the multi-depot inventory routing problem. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**. v. 122, Feb. 2019, P. 524-544. 2019.

BRAEKERS, K; RAMAEKERS, K; NIEUWENHUYSE, I Van. The vehicle routing problem: State of the art classification and review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 99, set 2016, p. 300-313, 2016.

CALVET, Laura; *et al.* Combining statistical learning with metaheuristics for the multi-depot vehicle routing problem with market segmentation. **Computers & industrial engineering**. V. 94, Apr. 2016, Pages 93-104, 2016.

CANHONG, Lin; *et al.* Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. **Expert Systems With Applications**, v.41, mar. 2014, p.1118-1138, 2014.

CATTARUZZA, Diego; ABSI, Nabil; FEILLET, Dominique. Vehicle routing problems with multiple trips. **4OR**, v. 14, n. 3, p. 223-259, 2016.

CATTARUZZA, Diego; ABSI, Nabil; FEILLET, Dominique. Vehicle routing problems with multiple trips. **Annals of Operations Research**, v. 271, n. 1, p. 127-159, 2018.

CHEN, Dongxu; YANG, Zhongzhen. Multiple depots vehicle routing problem in the context of total urban traffic equilibrium. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2017, 2017.

CHEN, Jiumei; SHI, Jing. A multi-compartment vehicle routing problem with time windows for urban distribution – A comparison study on particle swarm optimization algorithms. **Computers & Industrial Engineering**, Volume 133, Jul. 2019, p. 95-106, 2019.

CHEN, Lu; LIU, Yang; LANGEVIN, André. A multi-compartment vehicle routing problem in cold-chain distribution. **Computers & Operations Research**, Volume 111, nov. 2019, p. 58-66, 2019.

CHRISTIANSEN, Marielle *et al.* Ship routing and scheduling in the new millennium. **European Journal of Operational Research**, v. 228, n. 3, p. 467-483, 2013.

CUESTA, Eirik Fernández *et al.* Vessel routing with pickups and deliveries: an application to the supply of offshore oil platforms. **Computers & Operations Research**, v. 79, p. 140-147, 2017.

DU, Jiaoman; *et al.* Multi-depot vehicle routing problem for hazardous materials transportation: A fuzzy bilevel programming. **Information Sciences**, v. 399, ago. 2017, p. 201-218, 2017.

ESHTEHADI, Reza; DEMIR, Emrah; HUANG, Yuan. Solving the vehicle routing problem with multi-compartment vehicles for city logistics. **Computers & Operations Research**. V. 115, Mar 2020.

FALLAHI, Abdellah El; PRINS, Christian; WOLFLER Calvo, Roberto. A memetic algorithm and a tabu search for the multi-compartment vehicle routing problem. **Computers and Operations Research**, V.35(5), p.1725-1741, 2008.

FURTADO, Maria Gabriela S.; MUNARI, Pedro; MORABITO, Reinaldo. O problema de coleta e entrega com janelas de tempo na indústria petrolífera: modelos e métodos branch-and-cut. **Gestão & Produção**, v. 24, n. 3, p. 501-513, 2017.

HENKE, T.; SPERANZA, M. G.; WÄSCHER, G. The multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes. **European Journal of Operational Research**, v.246, n.3, p.730-743, 2015.

HENNIG, Frank *et al.* Alternative approaches to the crude oil tanker routing and scheduling problem with split pickup and split delivery. **European Journal of Operational Research**, v. 243, n. 1, p. 41-51, 2015.

IAKOVOU, Eleftherios T. An interactive multiobjective model for the strategic maritime transportation of petroleum products: risk analysis and routing. **Safety science**, v. 39, n. 1-2, p. 19-29, 2001.

KAABACHI, Islem; YAHYAOU, Hiba; KRICHEN, Saoussen; DEKDOUK, Abdelkader. Measuring and evaluating hybrid metaheuristics for solving the multi-compartment vehicle routing problem. **Measurement**, Volume 141, Jul. 2019, p. 407-419, 2019.

KARAKATIĆ, Sašo; PODGORELEC, Vili. A survey of genetic algorithms for solving multi depot vehicle routing problem. **Applied Soft Computing Journal**, Feb. 2015, v.27, p.519-532, 2015

LAHYANI, R.; COELHO, L. C.; KHEMAKHEM, M.; LAPORTE, G.; SEMET, F. A multi-compartment vehicle routing problem arising in the collection of olive oil in Tunisia. **Omega**, v.51, p.1-10, 2015.

LI, Jian; LI, Yang; PARDALOS, Panos. Multi-depot vehicle routing problem with time windows under shared depot resources. **Journal of Combinatorial Optimization**. v.31(2), p.515-532, 2016.

MARTINS, Sara; OSTERMEIER, Manuel; AMORIM, Pedro; HÜBNER, Alexander; Almada-Lobo, Bernardo. Product-oriented time window assignment for a multi-compartment vehicle routing problem. **European Journal of Operational Research**, Volume 276, Issue 3, 1 August 2019, Pages 893-909

MONTOYA-TORRES, J. *et al.* A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. **Computers & Industrial Engineering**, v. 79, p. 115-129, 2015.

MUYLDERMANS, L.; PANG, G. On the benefits of co-collection: experiments with a multi-compartment vehicle routing algorithm. **European Journal of Operational Research**, v.206, n.1, p.93-103, 2010.

OSTERMEIER, Manuel; HÜBNER, Alexander. Vehicle selection for a multi-compartment vehicle routing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 269, Issue 2, 1 Set. 2018, Pages 682-694. 2018.

PAZ, Juan; GRANADA-ECHEVERRI, Mauricio; ESCOBAR, John Willmer. The multi-depot electric vehicle location routing problem with time Windows. **International Journal of Industrial Engineering Computations**. V. 9. p. 123-136, 2018

PETROBRAS, 2019. **Pré-Sal**. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal>. Acesso em 01 de dezembro de 2019.

PINTO, Gustavo de Luna *et al.* Planning the transport of loads to oil platforms considering the arrangement of the loads on the ship's deck. **Computers & Industrial Engineering**, v. 119, p. 289-300, 2018.

PINTO, André Pereira *et al.* Planejamento tático de rotas marítimas para suprimento de plataformas de produção de petróleo. **Transportes**, v. 27, n. 1, p. 65-81, 2019.

PUCU, P. A. B. **Logística do escoamento da produção de petróleo de plataformas offshore via transporte naval**. 2011. 49 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Centro de tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

RAMOS, Tânia Rodrigues Pereira; GOMES, Maria Isabel; BARBOSA-PÓVOA, Ana Paula. Economic and environmental concerns in planning recycle waste collection systems. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 62, p. 34-54, 2014.

REED, M.; YIANNAKOU, A.; EVERING, R. An ant colony algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem. **Applied Soft Computing**, v.15, p.169-176, 2014.

RENAUD, Jacques; LAPORTE, Gilbert; BOCTOR, Fayez F. A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 23, n. 3, p. 229-235, 1996.

RODRIGUES, Vinícius P. *et al.* Ship routing with pickup and delivery for a maritime oil transportation system: MIP model and heuristics. **Systems**, v. 4, n. 3, p. 31, 2016.

RODRIGUES, Vinícius Picanço *et al.* Abordagens de otimização para um problema de roteirização e programação de navios petroleiros. **Gestão & Produção**, v. 24, n. 4, p. 790-805, 2017.

ROSENGREN, Mats. Early Production in Deep Water. **World Petroleum Congress**, 2006.

SIDDIQUI, Atiq W.; VERMA, Manish. A bi-objective approach to routing and scheduling maritime transportation of crude oil. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 37, p. 65-78, 2015.

SILVESTRIN, Paulo Vitor; RITT, Marcus. An iterated tabu search for the multi-compartment vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, Volume 81, May 2017, p. 192-202, 2017.

SOMOS ONLINE, 2017. **A Petrobras comemora 40 anos produção comercial na Bacia de Campos**. Disponível em <https://somosassim.com.br/portal/97313-2>. Acesso em 01 de dezembro de 2019.

STANZANI, Amelia de Lorena *et al.* Optimizing multiship routing and scheduling with constraints on inventory levels in a Brazilian oil company. **International Transactions in Operational Research**, v. 25, n. 4, p. 1163-1198, 2018.

ZARE-REISABADI, Esmat; MIRMOHAMMADI, S. Hamid. Site dependent vehicle routing problem with soft time window: Modeling and solution approach. **Computers & Industrial Engineering**, v. 90, p. 177-185, 2015.

ZHEN, Lu; *et al.* Multi-depot multi-trip vehicle routing problem with time windows and release dates. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**. v 135, mar. 2020.

WANG, Xingyin; *et al.* The min–max split delivery multi-depot vehicle routing problem with minimum service time requirement. **Computers & operations research**. V. 71, Jul. 2016, p. 110-126, 2016.

WANG, Yong; *et al.* Collaborative multi-depot logistics network design with time window assignment. **Expert Systems with Applications**. V. 140. Feb. 2020