

Planejamento das viagens dos navios com múltiplos tanques, múltiplos portos e múltiplas viagens para coleta do petróleo produzido em plataformas

Planning trips for ships considering multiple tanks, multiple ports and multiple trips to collect oil produced on platforms

Jeani dos Santos da Silva Dias¹, Rodrigo de Alvarenga Rosa¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo – Brasil

contato: jeani.jss@gmail.com (JSSD); rodrigoalvarengarosa@gmail.com,  (RAR)

Recebido:

08 de junho de 2021

Aceito para publicação:

30 de setembro de 2022

Publicado:

30 de março de 2023

Editor de área:

Claudio Barbieri da Cunha

Palavras-chave:

Logística do petróleo.
Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos.
Roteamento de Veículos com Múltiplos Compartimentos.
Roteamento de Veículos com Múltiplas rotas.

Keywords:

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

RESUMO

O planejamento das várias viagens dos navios com múltiplos tanques para coletar petróleo em plataformas é um trabalho complexo, pois envolve muitas restrições operacionais. Citam-se: 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 para começar a retirada de petróleo. Para realizar esse planejamento é proposto um novo modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista considerando várias viagens, múltiplos portos, múltiplos tanques 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, Petrobras. 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%.

ABSTRACT

Planning the multiple voyages of ships with multiple cargo holds to collect oil on platforms is a complex job because it involves many operational 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 time to start oil withdrawal. To carry out this planning, a new mathematical model is proposed considering several trips, multiple ports, multiple compartments and the restrictions mentioned in order 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%.

DOI: 10.58922/transportes.v31i1.2630



1. INTRODUÇÃO

A produção de petróleo em águas brasileiras teve um grande aumento nas últimas décadas. De acordo com a Agência Nacional de Petróleo - ANP (2020) a produção de petróleo em águas brasileiras passou de 1.079 mil barris de óleo equivalente em janeiro de 2000 para 3.773 mil barris de óleo equivalente em janeiro de 2020. A maior parte da produção de petróleo do Brasil ocorre no mar utilizando instalações chamadas de plataformas, que coletam o petróleo dos poços, sendo que, o petróleo produzido nas plataformas pode ser de diferentes tipos.

As plataformas têm capacidade limitada de armazenamento do petróleo retirado dos poços e, caso essa capacidade seja toda ocupada, a plataforma teria que parar a produção de petróleo. Assim, é necessário que navios com múltiplos tanques retirem o petróleo armazenado na plataforma para que a produção não seja paralisada por falta de capacidade de armazenamento. Vale ressaltar que diferentes tipos de petróleo não podem ser transportados no mesmo tanque de um navio, porém, é possível transportar em uma viagem de um navio petróleo do mesmo tipo de origens diferentes no mesmo tanque.

Para elaborar as viagens dos navios que irão fazer a retirada do petróleo das plataformas, uma equipe de planejamento, a cada mês, recebe as solicitações de atendimento das plataformas para retirada do petróleo. 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, tipo de óleo; quantidade a ser retirada}. Ao longo do horizonte de planejamento cada plataforma, dependendo da sua capacidade de produção e de armazenamento, pode precisar de mais de um descarregamento de petróleo, e cada um é atendido uma única vez por um navio. Os objetivos da equipe de planejamento são: 1) reduzir os custos de transporte (custo de afretar navios mais o custo por quilômetro navegado), 2) reduzir a quantidade de tanques utilizados em cada viagem, visando a agilidade do descarregamento no porto, e 3) reduzir o tempo total de viagem dos navios.

Cada navio realiza uma ou mais viagens dentro do horizonte de planejamento, sendo que uma viagem pode iniciar em um porto e terminar em um porto diferente, porém toda a carga coletada em uma viagem deve ser descarregada no porto de término da viagem. Cada navio, em função de suas dimensões lineares (calado, comprimento e boca), não pode visitar algumas plataformas e alguns portos. Em cada viagem de um navio deve ser respeitada a capacidade máxima de cada tanque, considerando que cada tanque pode ser carregado com somente um tipo de petróleo.

Para exemplificar o problema descrito é apresentada a Figura 1, na qual pode-se perceber que o Navio 1 fez apenas uma viagem, coletando petróleo das plataformas P01, P02 e P03. O Navio 2 faz duas viagens, sendo que na primeira viagem ele coleta petróleo de outro atendimento da plataforma P01 e na segunda viagem coleta petróleo das plataformas P04 e P05. A necessidade de realizar novas viagens pode ser causada por limitação de tempo de viagem ou por limitação de capacidade.

Neste artigo o problema de planejamento das várias viagens dos navios com múltiplos tanques, considerando restrições de acessos a portos e plataformas e restrições de períodos de atendimento, foi analisado. Foi proposto um modelo matemático para resolver o problema e 33 instâncias foram propostas com base na operação da empresa Petrobras. Não foi encontrada, na literatura pesquisada, nenhuma publicação que incorporasse todas essas restrições apresentadas em um único modelo matemático. Vale destacar que a modelagem proposta pode

ser aplicada a qualquer problema de roteamento com múltiplos compartimentos, frota heterogênea, múltiplas viagens, restrições de acesso e múltiplos depósitos.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: Na Seção 2 são apresentados os conceitos relevantes e uma breve revisão bibliográfica sobre roteamento de veículos com múltiplos compartimentos. A Seção 3 apresenta as instâncias propostas. Na Seção 4, o modelo matemático é apresentado. Na Seção 5 são apresentados os resultados e análises e na Seção 6 são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

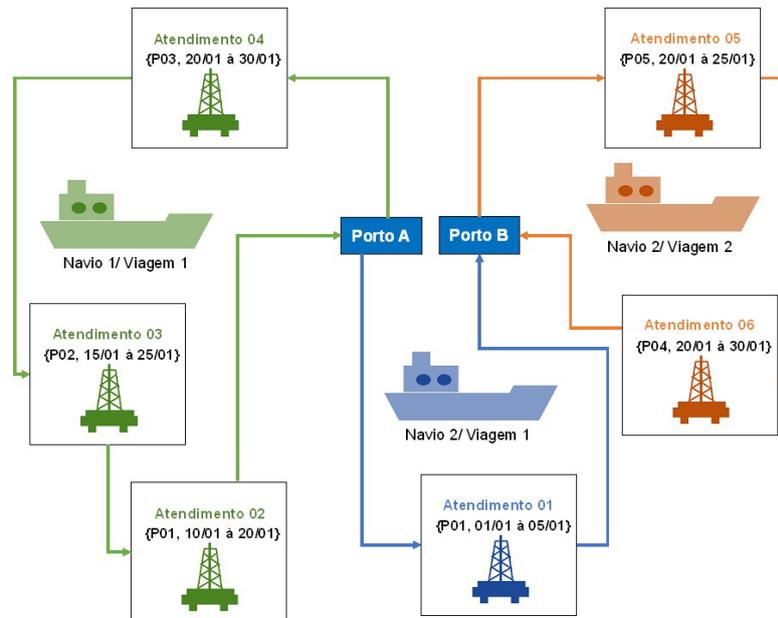


Figura 1. Exemplo de planejamento de viagens de navios para coleta do petróleo em plataformas

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O problema de planejar o transporte de petróleo das plataformas para os portos envolve a definição dos momentos de deslocamento das viagens de cada navio considerando sua capacidade de armazenamento. Alguns autores trataram desse problema sem considerar a compartimentalização dos navios para transportar simultaneamente produtos diferentes. Siddiqui e Verma (2015) apresentaram uma programação de otimização para minimizar custo operacional e risco de transporte, visando planejar rotas e cronogramas para uma frota heterogênea de petroleiros. Hennig et al. (2015) estudaram 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. Astoures, Rosa e Rosa (2016) desenvolveram um modelo matemático baseado no problema de roteamento de veículos com instalações intermediárias de reabastecimento para fornecimento de diesel para plataformas. Rodrigues et al. (2016; 2017), Furtado, Munari e Morabito (2017) e Stanzani et al. (2018) desenvolveram modelos matemáticos considerando restrições nos níveis de estoques com o objetivo de minimizar os custos para transportar petróleo a partir de plataformas no litoral brasileiro. Agra et al. (2014) apresentaram um problema de distribuição de óleo combustível em ilhas de Cabo Verde, onde é necessário considerar os limites de estoque de cada ponto de abastecimento. Foram determinados horários e rotas para a frota de navios utilizando diferentes estratégias de combinações de heurísticas.

Dentre os modelos matemáticos de roteamento de veículos, o modelo que mais se aproxima do proposto neste artigo é o *Multi-Compartment Vehicle Routing Problem* (MCVRP) que

considera que diferentes produtos são transportados em compartimentos diferentes no mesmo veículo, esses produtos não podem ser misturados devido a diferenças em suas características individuais (Abdulkader, Gajpal e Elmekawy, 2015). Como o problema tratado neste artigo também considera que os navios podem realizar múltiplas viagens, deve-se considerar o modelo *Multi-Trip Vehicle Routing Problem* (MTVRP), o qual admite que cada veículo dentro do horizonte de planejamento pode realizar mais de uma viagem (Cattaruzza, Absi e Feillet, 2018). Como o problema tratado considera ainda que existem vários portos, deve-se considerar o modelo *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP) (Montoya-Torres et al., 2015).

Como o problema tratado neste artigo considera que certos navios não podem atracar na plataforma e/ou no porto, deve-se considerar o *Site Dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP) que considera que existem diferentes tipos de veículos e que cada cliente precisa de um tipo especial de veículo para ser atendido (Zare-Reisabadi e Hamid Mirmohammadi, 2015). Deve-se considerar ainda o modelo *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) que pressupõe que o atendimento a um determinado cliente deve ocorrer em um determinado intervalo de tempo (Braekers, Ramaekers e Van Nieuwenhuysse, 2016), da mesma forma que ocorre nas plataformas de petróleo. Por fim, deve-se considerar o modelo *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* (HFVRP) que considera diferentes tipos de veículos, assim como foi considerado neste artigo diferentes tipos de navios com diferentes quantidades de tanques (Braekers, Ramaekers e Van Nieuwenhuysse, 2016). Tendo em vista que o modelo principal para representar o problema é o MDCVRP, incorporando todos os modelos citados anteriormente, a seguir é apresentada uma revisão bibliográfica sobre ele e suas variantes.

De acordo com Ostermeier et al. (2021) a literatura disponível sobre os problemas de roteirização de veículos cujo espaço de carga é ou pode ser compartimentado tem crescido constantemente nas últimas décadas abrangendo áreas de aplicação clássicas, como distribuição de combustível, coleta de resíduos, transporte agrícola, entregas de alimentos e transporte marítimo, mas também áreas emergentes, como o compartilhamento de bicicletas. 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. Henke, Speranza e Wäscher (2015) discutiram um problema de roteamento de veículos que poderiam ter seus compartimentos divididos em compartimentos menores para coleta de diferentes resíduos de vidro. Silvestrin e Ritt (2017) realizaram o planejamento de viagens de veículos com vários compartimentos cujas demandas de diferentes tipos de produtos poderiam ser atendidas em várias visitas. Kaabachi et al. (2019) apresentaram um problema de minimizar a distância total percorrida ao usar um número mínimo de caminhões com vários compartimentos para transportar diferentes tipos de produtos. Abdulkader, Gajpal e Elmekawy (2015), Henke, Speranza e Wäscher (2015), Silvestrin e Ritt (2017) e Kaabachi et al. (2019) se diferenciam do presente artigo por utilizarem frota homogênea, apenas um depósito e não terem restrições de tempo para atendimento.

Chen, Liu e Langevin (2019), Martins et al. (2019) e Eshtehadi, Demir e Huang (2020) apresentaram problemas de roteamento de veículos com vários compartimentos com janela de tempo e com apenas um depósito. Chen, Liu e Langevin (2019) estudaram o problema de roteamento de veículos de uma empresa de Xangai de distribuição de suprimentos climatizados. Martins et al. (2019) abordaram uma configuração com janelas de tempo flexíveis para atender supermercados. Eshtehadi, Demir e Huang (2020) consideraram a incerteza no tempo de serviço e no tempo de viagem. Lahyani et al. (2015) e Ostermeier e Hübner (2018) se diferem do presente trabalho pois utilizaram apenas um depósito, um tipo de veículo e não

consideraram restrições de tempo para atendimento. Lahyani et al. (2015) resolveram um problema de roteamento de veículos de múltiplos compartimentos, em diversos períodos e com vários produtos resultantes da coleta de azeite na Tunísia. Ostermeier e Hübner (2018) abordaram o problema de roteamento e seleção de veículos com apenas um ou com vários compartimentos para distribuição de mercadorias para mercearias. Alinaghian e Shokouhi (2018) apresentaram um problema de múltiplos compartimentos e com múltiplos depósitos para roteamento sem janelas de tempo. Eles consideraram a possibilidade de dividir as entregas de um conjunto de produtos solicitados utilizando um único tipo de veículo.

Conforme apresentado anteriormente, o presente problema trata do roteamento de navios com diferentes características e com vários tanques para coletar diferentes tipos de petróleo de plataformas, em períodos pré-estabelecidos, e enviar esses produtos para alguns portos. Após a revisão bibliográfica, pode-se dizer que a proposta deste artigo de um modelo matemático para MCVRP com janela de tempo, múltiplas viagens e restrições de acesso para resolver o roteamento do problema de coleta de petróleo, conforme descrito anteriormente, é inovadora entre as mais diversas publicações sobre o assunto.

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS

O problema tratado diz respeito à operação da Petrobras, que é a maior empresa brasileira de exploração marítima de petróleo. Ela opera cerca de 92 plataformas produtoras de petróleo e os campos operados pela empresa foram responsáveis por 94,3% do petróleo e do gás natural produzidos no Brasil (ANP, 2020). Dentre as plataformas da Petrobras, foram selecionadas plataformas para elaborar o planejamento das viagens com horizonte de planejamento de um mês. Os dados operacionais necessários para o planejamento das viagens incluem informações sobre: 1) a frota (número de navios, posição de liberação, custos, capacidade por tanque, velocidade de navegação); 2) informações sobre os portos e plataformas (localização, número máximo de navios aceitos por período de planejamento, tempo de manobra ou atracação dos navios, existência ou não de restrição de acesso de algum tipo de navio); e 3) atendimentos (tipo de petróleo, volume, janela de tempo, velocidade de transferência da carga). Para descarregar o petróleo recolhido das plataformas foram considerados dois portos, o Terminal de Ilha D'agua e o Terminal Angra dos Reis. Foram considerados 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. 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 gerar as instâncias foram selecionadas 10 plataformas da bacia do Espírito Santo e do norte da Bacia de Campos. 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 e cinco navios diferentes disponíveis. 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 e seis navios diferentes disponíveis. Também foram geradas instâncias com 33 atendimentos considerando as 10 plataformas. A partir dos dados da empresa estudada e, considerando possíveis mudanças no problema, foram geradas trinta e três instâncias divididas em 6 grupos, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das instâncias

Grupo	Análise	Instância	Número de atendimentos	Navios disponíveis			Restrição acesso nas plataformas	Restrição de acesso a portos	Número porões	Portos	Tipos de Petróleo	Capacidade máxima do navio para atracar na plataforma
				Nº 1	Nº 2	Nº 3						
Grupo 0	Instância base	1	13	2	2	1	Sim	Não	6	1 e 2	3	60%
		2	20	2	2	2	Sim	Não	6	1 e 2	3	60%
		3	33	4	3	3	Sim	Não	6	1 e 2	3	60%
		4	13	2	2	1	Sim	Não	3	1 e 2	3	60%
		5	13	2	2	1	Sim	Não	1	1 e 2	3	60%
Grupo 1	Quantidade de porões	6	20	2	2	2	Sim	Não	3	1 e 2	3	60%
		7	20	2	2	2	Sim	Não	1	1 e 2	3	60%
		8	33	4	3	3	Sim	Não	3	1 e 2	3	60%
		9	33	4	3	3	Sim	Não	1	1 e 2	3	60%
		10	13	2	2	1	Sim	Não	6	Apenas o 1	3	60%
Grupo 2	Portos disponíveis	11	13	2	2	1	Sim	Não	6	Apenas o 2	3	60%
		12	20	2	2	2	Sim	Não	6	Apenas 1	3	60%
		13	20	2	2	2	Sim	Não	6	Apenas o 2	3	60%
Grupo 3	Quantidade de produtos	14	13	2	2	1	Sim	Não	6	1 e 2	2	60%
		15	13	2	2	1	Sim	Não	6	1 e 2	1	60%
		16	20	2	2	2	Sim	Não	6	1 e 2	2	60%
		17	20	2	2	2	Sim	Não	6	1 e 2	1	60%
		18	13	2	2	1	Não	Não	6	1 e 2	3	60%
Grupo 4	Retirada das restrições de acesso de navios às plataformas	19	13	5	0	0	Não	Não	6	1 e 2	3	60%
		20	13	0	0	5	Não	Não	6	1 e 2	3	60%
		21	20	2	2	2	Não	Não	6	1 e 2	3	60%
		22	20	6	0	0	Não	Não	6	1 e 2	3	60%
		23	13	2	2	1	Sim	Navio tipo 1 ao porto 1	6	1 e 2	3	60%
Grupo 5	Limitação de atracação de navios em portos	24	13	2	2	1	Sim	Navio tipo 1 ao porto 2	6	1 e 2	3	60%
		25	20	2	2	2	Sim	Navio tipo 1 ao porto 1	6	1 e 2	3	60%
		26	20	2	2	2	Sim	Navio tipo 1 ao porto 2	6	1 e 2	3	60%
Grupo 6	Inclusão de restrição de acesso por limitação de carga a bordo do navio	27	13	2	2	1	Não	Não	6	1 e 2	3	100%
		28	13	2	2	1	Não	Não	6	1 e 2	3	50%
		29	13	2	2	1	Não	Não	6	1 e 2	3	40%
		30	20	2	2	2	Não	Não	6	1 e 2	3	100%
		31	20	2	2	2	Não	Não	6	1 e 2	3	50%
		32	20	2	2	2	Não	Não	6	1 e 2	3	40%
		33	33	4	3	3	Sim	Não	6	1 e 2	3	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 tanques 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, ela é a instâncias base para as instâncias com 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, ela é a instâncias base para as instâncias com 20 atendimentos. Já a Instância 3 considera os atendimentos da Instância 1 e da Instância 2 e possui 33 atendimentos, ela é a instâncias base para as instâncias com 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 tanques. 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. 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. 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. O Grupo 5 é composto por 4 instâncias para avaliar o impacto da inclusão de restrição de acesso de navios aos portos. E 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.

4. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O novo modelo matemático foi desenvolvido considerando problemas com frota heterogênea, múltiplos depósitos, múltiplos compartimentos, múltiplas viagens e janelas de tempo. Este se difere dos demais artigos publicados, pois contempla muitas restrições no mesmo problema. O modelo matemático proposto é apresentado em cinco partes: parâmetros, conjuntos, variáveis de decisão, função objetivo e restrições. Considerando nr o número de viagens, np os portos, nt os atendimentos, ntv tipos de navios, nv navios com nw tanques que transportam ng tipos de petróleo, o modelo matemático é apresentado a seguir.

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 e 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 de viagem que podem ser realizadas pelos navios, $R = \{1, \dots, n_r\}$;

P ; Conjunto de produtos, $P = \{1, \dots, n_g\}$;

W ; Conjunto de compartimentos que os navios podem ter, $W = \{1, \dots, n_w\}$;

CV ; Conjunto de tipos de navios, $TV = \{1, \dots, n_{tv}\}$.

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, eles foram criados

para a estrutura do grafo representativo do problema de roteamento de veículos. Os navios devem terminar suas viagens sempre em um porto virtual.

Parâmetros:

$TV_{i,j}$; Tempo de viagem entre nós $i, j \in PTP$ em horas;

A_i ; Momento de início do período que é possível começar a retirar petróleo do atendimento $i \in NT$ em horas;

B_i ; Momento final do período que é possível começar a retirar petróleo do atendimento $i \in NT$ em horas;

TT ; Período de planejamento em horas para todas as rotas;

MT_i ; Tempo de manobra ou de atracação dos navios na plataforma ou no porto $i \in PTP$ em horas;

$OT_{i,p}$; Velocidade da operação de descarregamento do produto $p \in P$ na plataforma ou no porto $i \in PTP$ em km/h;

$Q_{i,p}$; Volume de cada produto $p \in P$ de cada plataforma $i \in PTP$ em mil m^3 ;

$D_{i,j}$; Distância entre nós $i, j \in PTP$ em quilômetros;

CK_v ; Custo do quilometro percorrido do navio $v \in MD$ em US\$;

CF_v ; Custo fixo para utilizar o navio $v \in MD$ em US\$;

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 $v \in MD$ em mil m^3 ;

VT_v ; Tipo do navio $v \in MD$;

$VTC_{i,vt}$; Parâmetro que vale 1 se o tipo de navio $vt \in CV$ 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;

$M1$; Parâmetro utilizado para ativação e desativação das Equações 12, 13, 14, 15 e 16, foi adotado o valor de 600,0;

$M2$; Parâmetro utilizado para ativação e desativação das Equações 21, foi adotado o valor de 200,0;

$M3$; Parâmetro utilizado para ativação e desativação das Equações 27, foi adotado o valor de 260,0;

$M4$; Parâmetro utilizado para ativação e desativação das Equações 37, 38 e 39, foi adotado o valor de 260,0;

O valor do parâmetro $M1$ diz respeito a variável de decisão $t_{i,v,r}$ (Tempo que o veículo $v \in MD$ chega no nó $i \in PTP$ na viagem $r \in R$) que é limitada pelo valor do parâmetro TT . Dessa forma, adotou-se o valor de $M1$ como o valor de TT mais 50%, ficando $M1$ igual a 600,0.

O parâmetro $M2$ está relacionado com a variável 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). Como essa variável de decisão, para cada navio $v \in MD$ pode variar $i \in PR, j \in NT$ e $r \in R$. Sendo $|PR| = 2, |NT| = 33$ e $|R| = 3$ na maior instância testada, considerando um acréscimo de 50%, adotou-se $M2$ igual a 200,0.

Para o parâmetro $M3$, que diz respeito às variáveis de decisão $qc_{i,p,w,v,r}$ (Volume em mil m^3 do produto $p \in P$ em cada compartimento $w \in W$ do navio $v \in MD$, na viagem $r \in R$, quando

chega no atendimento $i \in NT$), sabendo que $qc_{i,p,w,v,r}$ é limitado pelo parâmetro $CC_{v,w}$ (Capacidade máxima do compartimento $w \in W$ do navio $v \in MD$ em mil m^3), que tem o valor máximo de 168,0, acrescentando 50%, estabelece-se que $M3$ é igual 260,0.

O valor do parâmetro $M4$ tem relação com a variável de decisão e $qn_{i,v,r}$ (Volume em mil m^3 dos produtos do navio $v \in MD$ quando chega no nó $i \in PTP$ na viagem $r \in R$). O maior volume possível do maior navio em todas as instâncias é de 168,0. Assim, adotou-se $M4$ igual a 260,0.

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 $r \in R$;

$qn_{i,v,r}$; Volume em mil m^3 de todos os produtos no navio $v \in MD$ quando chega no nó $i \in PTP$ na viagem $r \in R$;

$qc_{i,p,w,v,r}$; Volume em mil m^3 do produto $p \in P$ 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 no roteamento e 0, caso contrário.

Função Objetivo:

Minimizar

$$\sum_{v \in MD} CF_v vu_v + \sum_{i \in PTP} \sum_{j \in PTP} \sum_{v \in MD} \sum_{r \in R} CK_v D_{i,j} x_{i,j,v,r} + \sum_{p \in P} \sum_{w \in W} \sum_{v \in MD} \sum_{r \in R} z_{p,w,v,r} \quad (1)$$

Sujeito a:

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

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

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

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

$$\sum_{j \in PVT} x_{i,j,v,r} \leq \sum_{h \in PRT} x_{h,(i+np+nt),v,(r-1)} \quad \forall i \in PR, v \in MD, r \in R | r \geq 2 \quad (6)$$

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

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

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

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

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

$$t_{j,v,r} \geq t_{i,v,r} + \left(TV_{i,j} + MT_i + \sum_{p \in P} \frac{Q_{i,p}}{OT_{i,p}} \right) x_{i,j,v,r} - (1 - x_{i,j,v,r}) M1 \quad \forall v \in MD, i \in PRT, j \in PVT, r \in R \quad (12)$$

$$t_{i,v,r} \geq t_{(i+np+nt),v,(r-1)} + \sum_{j \in NT} \sum_{p \in P} \sum_{w \in W} qc_{j,p,w,v,(r-1)} / OT_{i,p} + MT_{i+np+nt} \sum_{h \in NT} x_{h,(i+np+nt),v,(r-1)} - \left(1 - \sum_{h \in PRT} x_{h,(i+np+nt),v,(r-1)} \right) M1 \quad \forall v \in MD, i \in PR, r \in R | r \geq 2 \quad (13)$$

- $$t_{i,v,r} \leq M1 \sum_{h \in PRT} x_{h,(i+np+nt),v,(r-1)} \quad \forall v \in MD, i \in PR, r \in R | r \geq 2 \quad (14)$$
- $$t_{(i+np+nt),v,r} \leq M1 \sum_{h \in PRT} x_{h,(i+np+nt),v,r} \quad \forall v \in MD, i \in PR, r \in R \quad (15)$$
- $$t_{i,v,r} \leq M1 \sum_{h \in PVT} x_{i,h,v,r} \quad \forall v \in MD, i \in PR, r \in R \quad (16)$$
- $$t_{i,v,r} \geq A_i \sum_{j \in PVT} x_{i,j,v,r} \quad \forall i \in NT, v \in MD, r \in R \quad (17)$$
- $$t_{i,v,r} \leq B_i \sum_{j \in PVT} x_{i,j,v,r} \quad \forall i \in NT, v \in MD, r \in R \quad (18)$$
- $$t_{i,v,r} \leq TT \quad \forall i \in PVT, v \in MD, r \in R \quad (19)$$
- $$\sum_{i \in PR} \sum_{j \in NT} \sum_{r \in R} x_{i,j,v,r} \geq vu_v M \quad \forall v \in MD \quad (20)$$
- $$\sum_{i \in PR} \sum_{j \in NT} \sum_{r \in R} x_{i,j,v,r} \leq vu_v M2 \quad \forall v \in MD \quad (21)$$
- $$\sum_{v \in MD} vu_v \leq nv \quad (22)$$
- $$\sum_{v \in MD} vu_v \geq 1 \quad (23)$$
- $$\sum_{i \in PTP} x_{i,j,v,r} = 0 \quad \forall j \in PTP, v \in MD, r \in R | vtc_{j,VT_v} = 0 \quad (24)$$
- $$\sum_{j \in PTP} x_{i,j,v,r} = 0 \quad \forall i \in PTP, v \in MD, r \in R | vtc_{i,VT_v} = 0 \quad (25)$$
- $$\sum_{i \in NT} \sum_{v \in MD} \sum_{r \in R} x_{i,j,v,r} \leq MV_j \quad \forall j \in PV \quad (26)$$
- $$z_{p,w,v,r} \leq M3 \sum_{i \in NT} qc_{i,p,w,v,r} \quad \forall v \in MD, p \in P, w \in W, r \in R \quad (27)$$
- $$z_{p,w,v,r} \geq M \sum_{i \in NT} qc_{i,p,w,v,r} \quad \forall v \in MD, p \in P, w \in W, r \in R \quad (28)$$
- $$\sum_{p \in P} z_{p,w,v,r} \leq 1 \quad \forall v \in MD, w \in W, r \in R \quad (29)$$
- $$\sum_{w \in W} qc_{i,p,w,v,r} = Q_{i,p} \sum_{j \in PVT} x_{i,j,v,r} \quad \forall i \in NT, v \in MD, p \in P, r \in R \quad (30)$$
- $$\sum_{i \in NT} \sum_{p \in P} qc_{i,p,w,v,r} \leq CC_{v,w} \quad \forall v \in MD, w \in W, r \in R \quad (31)$$
- $$qn_{i,v,r} = 0 \quad \forall v \in MD, i \in PR, r \in R \quad (32)$$
- $$qn_{i,v,r} \leq \sum_{w \in W} CC_{v,w} \quad \forall i \in PTP, v \in MD, r \in R \quad (33)$$
- $$qn_{i,v,r} \leq \sum_{w \in W} CC_{v,w} \sum_{j \in PVT} x_{i,j,v,r} \quad \forall i \in PRT, v \in MD, r \in R \quad (34)$$
- $$qn_{i,v,r} \leq \sum_{w \in W} CC_{v,w} \sum_{j \in NT} x_{i,j,v,r} \quad \forall i \in PV, v \in MD, r \in R \quad (35)$$
- $$qn_{j,v,r} \leq qn_{i,v,r} + x_{i,j,v,r} \sum_{p \in P} Q_{i,p} + M4 (1 - x_{i,j,v,r}) \quad \forall i \in PRT, j \in PVT, v \in MD, r \in R \quad (36)$$
- $$qn_{j,v,r} \geq qn_{i,v,r} + x_{i,j,v,r} \sum_{p \in P} Q_{i,p} - M4 (1 - x_{i,j,v,r}) \quad \forall i \in PRT, j \in PVT, v \in MD, r \in R \quad (37)$$
- $$qn_{j,v,r} \leq \varphi \sum_{w \in W} CC_{v,w} \sum_{i \in NT} x_{i,j,v,r} + M4 (1 - \sum_{i \in NT} x_{i,j,v,r}) \quad \forall j \in NT, v \in MD, r \in R \quad (38)$$
- $$x_{i,j,v,r} \in \{0,1\} \quad \forall v \in MD, i \in PTP, j \in PTP, r \in R \quad (39)$$
- $$t_{i,v,r} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in PTP, v \in MD, r \in R \quad (40)$$
- $$vu_v \in \{0,1\} \quad \forall v \in MD \quad (41)$$
- $$qc_{i,p,w,v,r} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall v \in MD, i \in PTP, r \in R \quad (42)$$
- $$z_{p,w,v,r} \in \{0,1\} \quad \forall v \in MD, p \in P, w \in W, r \in R \quad (43)$$
- $$qn_{i,v,r} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in PTP, v \in MD, r \in R \quad (44)$$

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 tanques. 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 a chegada do navio no atendimento j começa após a saída do navio do nó i mais os tempos de operação no nó i , 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 no roteamento 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 tanque. A Restrição (30) representa que o volume de cada produto de cada atendimento nos tanques do navio utilizado deve ser igual à solicitação do atendimento. A restrição (31) define que o volume em cada tanque de cada navio não pode ultrapassar sua capacidade máxima.

A Restrição (32) assegura que cada navio sempre deve sair do porto sem carga. As restrições (33), (34) e (35) garantem que o volume carregado no navio nunca irá exceder a capacidade máxima informada. As restrições (36) e (37) 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 (38) 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 (39) a (44) 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. 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 maiores com 33 atendimentos. Para as outras instâncias foi definido um tempo máximo de processamento de 21.600 segundos (6 horas).

A Tabela 2 apresenta os resultados alcançados pelo CPLEX. As colunas representam, em sequência, o grupo de instâncias, as instâncias testadas, o número de atendimentos da instância, a função objetivo (FO), o *Lower Bound* (LB), o gap obtido do CPLEX ($gap=(UB-LB)/UB$) e o tempo de execução do CPLEX.

A Instância 6 difere da Instância 7 em relação ao número de compartimentos, sendo três compartimentos na Instância 6 e um na Instância 7. Dessa forma, de acordo com a equações apresentadas ao final da seção 4, têm-se 10.536 variáveis de decisão inteiras e 4.752 variáveis de decisão contínuas para a Instância 6 e para a Instância 7, têm-se 10.428 variáveis de decisão inteiras e 2.160 variáveis de decisão contínuas. Possivelmente, a maior quantidade de variáveis de decisão da Instância 6 demandou um esforço computacional maior do CPLEX para encontrar a solução, levando o CPLEX a não conseguir encontrar a solução ótima com gap igual 24,30%. Já na Instância 7, que possui menor quantidade de variáveis de decisão, o CPLEX conseguiu encontrar a solução ótima.

Tabela 2 – Resultados obtidos pelo CPLEX para as instâncias

Grupo	Instância	Número de atendimentos	FO	LB	Gap (%)	Tempo (s)
0	1	13	2.867.923,80	2.867.923,80	0,00	70,78
	2	20	3.700.593,80	3.680.025,91	0,56	21.600,00
	3	33	6.683.230,10	3.448.698,52	48,40	86.400,00
1	4	13	3.035.219,80	3.035.219,80	0,00	174,66
	5	13	3.715.227,90	3.715.227,90	0,00	14,81
	6	20	3.701.149,50	2.801.802,38	24,30	21.600,00
	7	20	3.708.622,70	3.708.622,70	0,00	1.895,70
	8	33	6.022.657,20	4.410.305,24	27,00	86.400,00
2	9	33	5.818.457,30	4.579.072,61	21,00	86.400,00
	10	13	2.863.842,70	2.863.842,70	0,00	34,39
	11	13	3.039.434,40	3.039.434,40	0,00	59,39
	12	20	3.043.021,90	3.043.021,90	0,00	7.871,26
3	13	20	3.051.910,10	3.051.910,10	0,00	4.460,58
	14	13	2.867.923,80	2.867.923,80	0,00	78,73
	15	13	2.867.922,80	2.867.922,80	0,00	53,92
	16	20	3.695.887,50	3.672.604,45	0,63	21.600,00
	17	20	3.543.061,40	2.805.318,53	20,82	21.600,00
4	18	13	2.821.189,10	2.821.189,10	0,00	520,74
	19	13	3.209.380,50	3.197.403,46	0,37	21.600,00
	20	13	3.593.520,00	3.593.520,000	0,00	1.316,98
	21	20	3.541.705,80	2.789.516,20	21,24	21.600,00
	22	20	3.260.115,90	3.211.033,03	1,51	21.600,00
5	23	13	2.870.528,50	2.870.528,50	0,00	66,42
	24	13	3.701.323,70	3.693.395,78	0,21	21.600,00
	25	20	2.867.923,80	2.867.923,80	0	58,3
	26	20	3.699.929,60	3.684.037,31	0,43	21.600,00
6	27	13	2.867.923,80	2.867.923,80	0,00	78,84
	28	13	3.041.507,30	3.041.507,30	0,00	109,95
	29	13	3.716.475,0	3.716.475,0	0,00	44,66
	30	20	3.697.752,30	3.675.009,59	0,62	21.600,00
	31	20	3.699.950,60	3.684.529,80	0,42	21.600,00
	32	20	3.712.296,10	3.712.296,10	0,00	5.059,66
	33	33	6.685.538,10	4.722.630,48	29,36	86.400,00

Todos os atendimentos das instâncias foram tratados e todas as restrições definidas para o problema foram atendidas. 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 tanque.

A Tabela 3 apresenta os resultados operacionais das instâncias propostas para avaliar os impactos das modificações entre elas, conforme descrito na Tabela 1. As colunas 3, 4, 5 e 6 dizem respeito ao número de navios, de acordo com a variável de decisão vu_{ij} . A coluna 7 apresenta as distâncias navegadas conforme a variável de decisão $x_{i,j,v,r}$ e o parâmetro $D_{i,j}$. As colunas 8 e 9 se referem, respectivamente, à primeira e à segunda parcela da função objetivo.

As instâncias com 13 atendimentos foram comparadas com a Instância 1, as instâncias com 20 atendimentos foram comparadas com a Instância 2 e as instâncias com 33 atendimentos foram comparadas com a Instância 3.

As instâncias do Grupo 1 visavam avaliar o impacto de utilizar navios com apenas três tanques ou com apenas um tanque, ao invés de seis tanques do Grupo 0. As instâncias com 13 atendimentos, Instâncias 4 e 5, apresentaram custos maiores com relação a Instância 1, o que indica que considerar múltiplos tanques em instâncias pequenas melhora o resultado operacional.

Tabela 3 – Análises dos resultados operacionais mais relevantes

Grupo	Instância	Navios utilizados				Distância navegada (km)	Custos		
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Total		fixo total (US\$)	variável total (US\$)	total (US\$)
0	1	1	2	0	3	7.481	2.814.800,0	53.070,8	2.867.870,8
	2	1	1	2	4	12.581	3.620.800,0	79.737,8	3.700.537,8
	3	3	1	3	7	17.903	6.572.000,0	111.136,1	6.683.136,1
1	4	2	1	0	3	6.510	2.988.400,0	46.795,8	3.035.195,8
	5	1	2	1	4	8.407	3.658.000,0	57.217,9	3.715.217,9
	6	2	1	2	5	13.030	3.620.800,0	80.318,5	3.701.118,5
	7	1	1	2	4	13.879	3.620.800,0	87.810,7	3.708.610,7
	8	4	0	2	6	18.326	5.902.400,0	120.210,2	6.022.610,2
	9	3	0	3	6	20.672	5.691.600,0	126.839,3	5.818.439,3
2	10	1	2	0	3	6.903	2.814.800,0	48.989,7	2.863.789,7
	11	2	1	0	3	7.089	2.988.400,0	50.987,4	3.039.387,4
	12	2	0	1	3	13.663	2.951.200,0	91.768,9	3.042.968,9
	13	2	0	1	3	14.957	2.951.200,0	100.657,1	3.051.857,1
3	14	1	1	1	3	7.481	2.814.800,0	53.070,8	2.867.870,8
	15	1	2	0	3	7.481	2.814.800,0	53.070,8	2.867.870,8
	16	1	1	2	4	12.234	3.620.800,0	75.034,5	3.695.834,5
	17	0	2	2	4	15.431	3.447.200,0	95.797,4	3.542.997,4
4	18	1	1	1	3	6.621	2.777.600,0	43.541,1	2.821.141,1
	19	3	0	0	3	6.485	3.162.000,0	47.340,5	3.209.340,5
	20	0	4	0	4	10.265	3.521.600,0	71.855,0	3.593.455,0
	21	0	2	2	4	14.708	3.447.200,0	94.440,8	3.541.640,8
	22	3	0	0	3	13.433	3.162.003,0	98.060,9	3.260.063,9
5	23	1	2	0	3	7.833	2.814.800,0	55.675,5	2.870.475,5
	24	1	2	0	3	7.598	2.814.800,0	53.854,7	2.868.654,7
	25	1	1	2	4	12.684	3.620.800,0	80.655,0	3.701.455,0
	26	1	1	2	4	12.529	3.620.800,0	79.077,7	3.699.877,7
6	27	1	2	0	3	7.481	2.814.800,0	53.070,8	2.867.870,8
	28	2	1	0	3	7.369	2.988.400,0	53.059,3	3.041.459,3
	29	1	2	1	4	8.456	3.658.000,0	58.421,0	3.716.421,0
	30	1	1	2	4	12.595	3.620.800,0	76.897,3	3.697.697,3
	31	1	1	2	4	12.616	3.620.800,0	79.093,6	3.699.893,6
	32	1	1	2	4	14.600	3.620.800,0	91.438,1	3.712.238,1
	33	3	1	3	7	18.360	6.572.000,0	113.443,1	6.685.443,1

As instâncias com 20 atendimentos do Grupo 1, Instâncias 6 e 7, não apresentaram resultados com diferenças significativas com relação aos apresentados na Instância 2. Logo, a

diminuição de tanques não indica melhorias operacionais significativas em instâncias médias. Um dos motivos para isso é que em instâncias 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 se houvesse mais tipos de produtos na mesma instância, o que obrigaria a ter mais navios para atender as restrições de menos tanques no planejamento.

As instâncias do Grupo 2 tinham por objetivo analisar o impacto da redução do número de portos disponíveis. Ao comparar os custos das instâncias de 13 atendimentos, Instâncias 10 e 11, foi sinalizado que o Porto 1 seria a melhor opção comparado com o Porto 2, pois apresenta menor custo de transporte para atender o grupo de plataformas. Entretanto, nas instâncias de 20 atendimentos, Instâncias 12 e 13, devido à localização dos portos, a escolha é indiferente considerando o custo de transporte. Não foi considerado nas análises das instâncias do Grupo 2 o custo do investimento já realizado e o custo para desmobilizar a instalação, logo 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 de três para dois e para um. Ao reduzir a quantidade de produtos nas instâncias com 13 atendimentos, Instâncias 14 e 15, não há redução nos custos. Entretanto, nas Instâncias 16 e 17 ao reduzir para 2 produtos os custos totais caem 0,1% e ao reduzir para 1 produto os custos caem 4,2%. 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. Na instância com 13 atendimentos, Instância 18, o custo de transporte diminuiu em 1,6% com relação a Instância 1 pois foi possível selecionar um dos navios menores e diminuir a distância navegada. Ao alterar a frota para apenas navios grandes, na Instância 19, ou com apenas navios pequenos, na Instância 20, os custos foram maiores, o que sinaliza que em instâncias pequenas ter uma frota de navios de diversas capacidades e custos é mais vantajoso do que ter uma frota homogênea

Nas instâncias com 20 atendimentos do Grupo 4, Instância 21, o custo de transporte diminuiu em 4,3% com relação a Instância 2 pois foi possível selecionar um dos navios menores. Já a instância que considerava apenas navios grandes, Instância 22, teve o custo 12,0% menor do a Instância 2. Esse resultado sinaliza que navios maiores, mesmo com custo fixos e variáveis maiores, conseguem atender uma maior quantidade de atendimentos em apenas uma viagem nas instâncias maiores, o que leva a uma menor distância navegada e uso de menos navios. Como a distância entre as instalações desse grupo de plataformas não é muito grande, os navios maiores conseguem coletar petróleo de mais plataformas antes de descarregar os produtos nos portos.

Vale comentar que permitir que todos os navios acessem todas as plataformas, sem qualquer restrição de acesso, seria uma alteração 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. Ao incluir a restrição de acesso do navio 1 ao porto 1 ou ao porto

2 o custo calculado não sofreu variação significativa pois a distância navegada aumentou em menos de 5,0%. 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.

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. Ao eliminar a restrição de carga máxima a bordo de 60,0% para receber óleo de um atendimento não ocorreu variação no custo de transporte. Entretanto, ao alterar a restrição de carga máxima a bordo para 50,0% e para 40,0% em instâncias pequenas o custo aumentou respectivamente 6,0% e 30,0% com relação a Instância 1. Entretanto, em instâncias maiores não ocorreu variação significativa no custo de transporte ao restringir a carga máxima a bordo para 50,0% ou para 40,0%. Esse resultado sugere que apenas em instâncias pequenas o aumento das restrições de limitação de carga a bordo do navio para atendimento traz impactos significativos no resultado final. É importante frisar que a empresa deve analisar as restrições de segurança considerando outros fatores além de custo de transporte, como os riscos e as consequências de um possível acidente.

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 17,8% menor do que 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 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 13,3% em relação à 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 20, que considerou apenas um tipo de navio pequeno para 13 atendimentos, que teve um aumento 37,1% em relação à Instância 1.

Pelos resultados mostrados anteriormente, pode-se perceber que o modelo matemático proposto atendeu ao propósito de planejar a elaboração de viagens para coleta de petróleo produzido em plataformas, permitindo, além do planejamento, diversas análises. O modelo proposto pode ser utilizado por qualquer empresa petrolífera que deseje planejar as viagens dos navios para atender a plataformas.

6. CONCLUSÕES

Este artigo abordou o problema de planejamento de viagens de navios para coleta de diferentes tipos de petróleo de plataformas de uma empresa petrolífera brasileira. Instâncias com dados baseados em informações reais foram resolvidos por meio de uma implementação de modelagem matemática. 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. Foram obtidas a redução do custo total de até 17,8% e a diminuição na distância total percorrida pelos navios de até 13,3% em relação às instâncias base.

Sugere-se como trabalho futuro o desenvolvimento de um algoritmo computacional para resolver o modelo matemático proposto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (307797/2019-8) e a Petrobras pelo apoio financeiro e de informações.

REFERÊNCIAS

- Abdulkader, M.M.S., Y. Gajpal e T.Y. Elmekawy (2015) Hybridized ant colony algorithm for the Multi Compartment Vehicle Routing Problem. *Applied Soft Computing*, v. 37, p. 196-203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2015.08.020>.
- Agra, A.; M. Christiansen; A. Delgado et al. (2014) Hybrid heuristics for a short sea inventory routing problem, *European Journal of Operational Research*, v. 236, n. 3, p. 924-35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.042>.
- Alinaghian, M. e N. Shokouhi (2018) Multi-depot multi-compartment vehicle routing problem, solved by a hybrid adaptive large neighborhood search, *Omega*, v. 76, p. 85-99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2017.05.002>.
- ANP (2020). Disponível em <<http://www.anp.gov.br>>. (acesso em 31/05/2020).
- Astoures, H.F.; R.A. Rosa e A.L.S. Rosa. (2016) 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. 11-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.002>.
- Braekers, K.; K. Ramaekers e I. Van Nieuwenhuysse (2016) The vehicle routing problem: state of the art classification and review, *Computers & Industrial Engineering*, v. 99, p. 300-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>.
- Cattaruzza, D.; N. Absi e D. Feillet (2018) Vehicle routing problems with multiple trips, *Annals of Operations Research*, v. 271, n. 1, p. 127-59. <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-018-2988-7>.
- Chen, L.; Y. Liu e A. Langevin (2019) A multi-compartment vehicle routing problem in cold-chain distribution, *Computers & Operations Research*, v. 111, p. 58-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2019.06.001>.
- Eshtehadi, R.; E. Demir e Y. Huang (2020) Solving the vehicle routing problem with multi-compartment vehicles for city logistics, *Computers & Operations Research*, v. 115, p. 104859. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2019.104859>.
- Furtado, M.G.S.; P. Munari e R. Morabito (2017) O problema de coleta e entrega com janelas de tempo na indústria petrolífera, *Gestão & Produção*, v. 24, n. 3, p. 501-13. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530x2297-16>.
- Henke, T.; M.G. Speranza e G. Wäscher (2015) The multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes, *European Journal of Operational Research*, v. 246, n. 3, p. 730-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.020>.
- Hennig, F.; B. Nygreen; K.C. Furman et al. (2015) 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.023>.
- Kaabachi, I.; H. Yahyaoui; S. Krichen et al. (2019) Measuring and evaluating hybrid metaheuristics for solving the multi-compartment vehicle routing problem, *Measurement*, v. 141, p. 407-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.019>.
- Lahyani, R.; L.C. Coelho; M. Khemakhem et al. (2015) A multi-compartment vehicle routing problem arising in the collection of olive oil in Tunisia, *Omega*, v. 51, p. 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2014.08.007>.
- Martins, S.; M. Ostermeier; P. Amorim et al. (2019) Product-oriented time window assignment for a multi-compartment vehicle routing problem, *European Journal of Operational Research*, v. 276, n. 3, p. 893-909. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.053>.
- Montoya-Torres, J.R.; J. López Franco; S. Nieto Isaza et al. (2015) A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots, *Computers & Industrial Engineering*, v. 79, p. 115-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.029>.
- Ostermeier, M. e A. Hübner (2018) Vehicle selection for a multi-compartment vehicle routing problem, *European Journal of Operational Research*, v. 269, n. 2, p. 682-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.059>.
- Ostermeier, M.; T. Henke; A. Hübner et al. (2021) Multi-compartment vehicle routing problems: state-of-the-art, modeling framework and future directions, *European Journal of Operational Research*, v. 292, n. 3, p. 799-817. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2020.11.009>.
- Rodrigues, V.P.; R. Morabito; D. Yamashita et al. (2016) Ship routing with pickup and delivery for a maritime oil transportation system: MIP model and heuristics, *SYSTEMS*, v. 4, n. 3, p. 31. <http://dx.doi.org/10.3390/systems4030031>.
- Rodrigues, V.P.; R. Morabito; D. Yamashita et al. (2017) Abordagens de otimização para um problema de roteirização e programação de navios petroleiros, *Gestão & Produção*, v. 24, n. 4, p. 790-805. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530x1767-16>.
- Siddiqui, A.W. e M. Verma (2015) 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.010>.

- Silvestrin, P.V. e M. Ritt (2017) An iterated tabu search for the multi-compartment vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, v. 81, p. 192-202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2016.12.023>.
- Stanzani, A.L.; V. Pureza; R. Morabito et al. (2018) 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. 1163-98. <http://dx.doi.org/10.1111/itor.12478>.
- Zare-Reisabadi, E. e S. Hamid Mirmohammadi (2015) Site dependent vehicle routing problem with soft time window: modeling and solution approach, *Computers & Industrial Engineering*, v. 90, p. 177-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2015.09.002>.