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

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

Adriano Roberto Bergmann
Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio, Brasil
Rua Marquês de São Vicente, 225, 950L – Gávea – Rio de Janeiro / RJ
adrianobergmann@aluno.puc-rio.br

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

RESUMO

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

PALAVRAS CHAVE. Roteamento de Navios, Coleta-e-entrega, Janelas de Tempo.

Tópicos. EN&PG – PO na Área de Energia, Petróleo e Gás; L&T – Logística e Transportes

ABSTRACT

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

KEYWORDS. Ship Routing, Pickup-and-delivery, Time Windows.

Paper topics. EN&PG–OR in Energy, Oil and Gas Area; L&T– Logistics and Transportation

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

1. Introdução

O modal marítimo é o principal meio de transporte do petróleo produzido no Brasil. Conforme dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários, em 2019 foram movimentados 240,3 milhões de toneladas de produtos na cabotagem, sendo que 41% deste total foi o transporte de petróleo das plataformas de produção *offshore* para os terminais aquaviários brasileiros [ANTAQ 2019]. Este transporte é conhecido na indústria petrolífera como "alívio de plataforma" e, ao chegar no terminal, o petróleo será estocado para posterior envio para refinarias ou será transbordado diretamente para navios de longo curso (para exportação). Outro dado relevante, é que mais de 96% de toda a produção de petróleo brasileira é no mar [ANP 2020a]. Dados esses mostram a importância de otimizar as operações do transporte marítimo de petróleo. Conforme Christiansen et al. [2004], um navio envolve um grande investimento de capital (milhões de dólares), e os custos operacionais diários são da ordem de dezenas de milhares de dólares. Logo, otimizar a utilização da frota impacta em significativo retorno financeiro, bem como redução de impacto ao meio ambiente.

Este trabalho apresenta uma aplicação prática do roteamento de navios no processo de coleta-e-entrega com janelas de tempo para o alívio de plataformas de petróleos para exportação. Rotear navios significa encontrar rotas factíveis e otimizadas para cada navio. Por rota, entende-se todas as operações que o navio fará ao longo do tempo, desde sua saída do ponto inicial, suas operações de alívio e a chegada no ponto final. Especificamente para este caso em estudo, os navios aliviadores fazem o transporte do petróleo das plataformas *offshore* diretamente para um terminal de transbordo, onde a carga é transferida para outro navio para ser exportado para outros países.

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

Assim, foram propostas adaptações ao modelo de programação linear inteira mista desenvolvido por Rodrigues et al. [2016] para roteamento de navios no alívio de plataformas. Estas adaptações buscam descrever as peculiaridades deste processo ligado à exportação de petróleo, bem como facilitar a sua resolução pelo método exato. O modelo foi testado com dados reais de uma empresa petrolífera brasileira.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: na Seção 2, é contextualizado o roteamento de navios e sua importância crescente dentro do novo marco regulatório para exploração e produção de petróleo no Brasil; na Seção 3, há uma descrição do processo de alívios de plataformas de petróleos e a formação de lotes para exportação; na Seção 4, é apresentada a formulação do problema de coleta-e-entrega e janelas de tempo aplicado ao processo de exportação de petróleo; na Seção 5, são apresentados os resultados computacionais através de cenários que representam quatros meses de programação real da empresa estudada. Por fim, na Seção 6, são apresentadas as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

2. Contextualização

O monopólio estatal do petróleo no Brasil iniciou em 1953 (Lei Federal nº 2004) e perdurou até 1997 (Lei Federal nº 9.478). Com o fim deste monopólio, que era exclusividade da Petrobras, as empresas privadas constituídas no Brasil tiveram a oportunidade de investir em exploração de petróleo, através de rodadas de licitação de blocos exploratórios. Os vencedores das rodadas licitatórias para muitos campos foram consórcios formados por diversas empresas petrolíferas, incluindo a própria Petrobras [PPSA 2019]. A partir do momento que um consórcio

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o Galoá proceedings

explora um campo com uma ou mais plataformas, há a necessidade de se ter uma programação prévia dos alívios (*lifting schedule*). Nessa programação são definidos os volumes a serem aliviados, a janela de tempo e quem será o responsável por este alívio (proprietário da carga). Para que cada integrante do consórcio tenha tempo suficiente para programar suas operações e seus navios aliviadores, a programação dos alívios é definida com antecedência.

Neste contexto de crescente formação de parcerias, perde espaço a gestão integrada de frota e de inventário exclusivamente através de modelos de MIRP (*Maritime Inventory Routing Problem*), que pode ser descrito num processo onde apenas um ator é responsável por controlar o inventário de petróleo (na plataforma e/ou no terminal de descarga), bem como as rotas e as programações dos navios aliviadores [Christiansen et al. 2013]. Para o caso em estudo, onde as datas dos alívios são pré-determinadas com antecedência, a roteirização de navios com janelas de tempo toma importância, no sentido de prover e otimizar a frota necessária. Assim, este trabalho busca otimizar as operações de navios aliviadores de uma grande empresa petrolífera que participa ativamente em vários consórcios de campos produtores e desta forma necessita aliviar o petróleo que lhe pertence, conforme programação prévia.

Para uma empresa petrolífera, é um importante diferencial competitivo ter modelos que possam nortear rapidamente as decisões tomadas no dia-a-dia da rotina dos programadores de navios. Respostas para perguntas como “haverá navio disponível para a janela proposta daqui a 30 dias?”, “qual navio deverá fazer o alívio da carga que foi postergada em 3 dias?”, “qual será a nova programação após os eventos de mau tempo?” ou “é interessante trocar a ordem de alívio com o parceiro que não poderá cumprir sua programação?” serão facilmente respondidas e melhor embasadas com o auxílio de algoritmos roteadores de navios. Estas decisões também têm impacto econômico e ambiental importante, pois evitam deslocamentos mais longos ou desnecessários, economizando *bunker* (combustível utilizado nestas embarcações) e evitando demais gastos operacionais.

3. Descrição do Processo

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

Em um nível de planejamento tático anterior, são definidos quais os petróleos e respectivos volumes serão disponibilizados para venda. A partir destas informações e considerando a programação de alívios já conhecida das plataformas em parceria, são formados os lotes de exportação. Cada lote é nomeado através de um *tag* e tem definido o nome do petróleo, volume a ser aliviado em cada origem (quais plataformas serão aliviadas), destino (terminal onde será feito o transbordo para o navio exportador) e suas respectivas janelas de tempo. Após este processo, os lotes são ofertados ao mercado.

Usualmente cada lote é formado por uma única qualidade (característica) de petróleo, o qual poderá vir de uma única plataforma ou de diferentes plataformas. Busca-se sempre aliviar o volume exato de uma venda de uma única plataforma. Muitas vezes isso não é possível e o mesmo

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o Galoá proceedings

navio aliviador deverá compor sua carga com dois alívios de duas plataformas diferentes ou aguardar a produção de uma mesma plataforma para uma segunda retirada. Essa divisão de lotes pode ocorrer por diversos motivos, sendo os mais recorrentes a baixa capacidade de armazenamento ou a baixa taxa de produção de algumas plataformas. Em outros casos, pode haver um alívio nomeado para a empresa e o alívio seguinte ser de responsabilidade de outro consorciado, ocasião em que será necessário desamarrar o aliviador próprio para que o navio do parceiro possa amarrar e carregar. Sempre que possível, busca-se fazer alívios com janelas de tempo consecutivas ou muito próximas, para otimizar o giro do navio. Se as janelas entre um alívio e outro do mesmo lote de exportação forem maiores que 2 ou 3 dias, deve-se decidir entre fazer o mesmo aliviador aguardar as duas retiradas ou utilizar dois aliviadores diferentes para este fim.

No terminal de transbordo, haverá a descarga do navio aliviador diretamente para o navio exportador, que fará a entrega ao cliente final. Caso o mesmo lote esteja fracionado em dois aliviadores, o navio exportador terá um tempo de espera maior, consequentemente maiores custos de aluguel e custos operacionais. Aguardará adicionalmente pela manobra de saída do primeiro aliviador e a manobra de entrada do segundo aliviador no terminal. Por manobra, entende-se o deslocamento do navio entre a área de fundeio e sua posição adequada no terminal ou vice-versa, bem como o engate correto dos mangotes de transferência. Cada manobra dura algumas horas e dependerá da maré, condições meteorológicas, luz do dia em alguns locais, entre outros fatores, além de demandar custos operacionais e portuários e maior exposição a riscos de segurança e meio-ambiente. Assim, dividir o mesmo lote em dois aliviadores diferentes é indesejável, porém, em alguns momentos pode ser necessário (quando não há disponibilidade de outro navio, por exemplo).

4. Revisão da Literatura

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

Como forma de resolver e otimizar problemas práticos do dia-a-dia, a pesquisa nesta área se desenvolveu através de modelos e métodos contendo características peculiares, tais como frota heterogênea, múltiplos depósitos, múltiplas rotas, janelas de tempo, coleta-e-entrega, entre outros. Braekers et al. [2016] classificaram as publicações envolvendo roteamento de veículos (VRPs) entre 2009 e meados de 2015 e mostraram que a literatura científica na atualidade é composta por uma gama bem ampla de variantes (características) e a maioria dos trabalhos são voltados para modelos realistas e soluções aplicadas. Como consequência, poucos trabalhos propõem abordagens gerais ou algoritmos capazes de resolver múltiplas variantes, sendo que muitas vezes as soluções são altamente adaptadas as particularidades destes problemas.

Neste artigo, o problema de coleta-e-entrega com janelas de tempo (*Pickup and Delivery Problem with Time Windows* – PDPTW) é tratado e consiste em rotear veículos para atender um conjunto de demandas de transporte entre origens e destinos previamente conhecidos, com restrições de capacidade e janelas de tempo, além de restrições de precedência e pareamento [Ropke et al. 2007]. Uma demanda consiste em coletar um produto em um determinado local e entregá-lo em outro, a origem deve preceder o destino e os dois locais devem ser visitados pelo mesmo veículo. Duas janelas de tempo são assumidas para cada demanda: uma para a coleta e outra para a entrega. Um veículo nunca deve chegar a um local após o horário final da janela de tempo, mas pode chegar antes do início da janela. Neste caso ele deve aguardar o horário estabelecido para iniciar a operação. Tempos de serviço também estão associados a cada demanda.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o Galoá proceedings

O primeiro trabalho de roteirização de veículos contendo características de coleta-e-entrega e restrições de janelas de tempo foi de Wilson et al. [1971] e buscava otimizar o transporte de passageiros, uma variante conhecida por "*Dial-A-Ride Problem"* (DARP). O trabalho de Dumas et al. [1991] foi precursor ao tratar de múltiplos veículos no transporte de mercadorias (*Multiple Vehicle Pickup and Delivery Problem with Time Windows – m*–PDPTW), propondo um algoritmo exato e utilizando uma abordagem da decomposição de *Dantzig-Wolfe* para sua solução. Uma extensão desta abordagem exata em conjunto com uma meta-heurística é apresentada no trabalho de Homsi et al. [2020] para um problema de roteamento e programação de navios.

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

Na indústria petrolífera, particularmente no processo de alívio de plataformas, Rodrigues et al. [2016] propõem um modelo de programação linear inteira mista baseada nas equações clássicas dos problemas de PDPTW, tendo como referência principal o trabalho de Cordeau et al. [2007].

5. Metodologia

Tendo como base a modelagem proposta por Rodrigues et al. [2016], foram implementadas as particularidades do processo de alívios de petróleos destinados à exportação. Pelo fato deste processo já ter uma frota dedicada e algumas regras operacionais, foi possível simplificar questões relacionadas a calado, tamanho do navio e posicionamento dinâmico (neste caso, o posicionamento dinâmico é inerente às operações). Além da necessidade do mesmo navio aliviar o mesmo lote quando formado por dois alívios distintos, as demais adaptações buscaram diminuir o tempo de processamento e facilitar a convergência do algoritmo pelo método exato, sem descaracterizar o problema em questão.

As demais premissas adotadas para este estudo foram:

- Não há restrições entre navios aliviadores e as plataformas elencadas para alívio. Qualquer navio pode amarrar vazio ou com meia carga em qualquer plataforma e começar a operação imediatamente.
- Não há restrições entre navios aliviadores e os navios de transbordo para exportação. Também não foram consideradas restrições sobre uma eventual formação de fila no terminal de destino dos alívios. Considera-se que o aliviador descarregará assim chegar no terminal e imediatamente estará disponível para a próxima operação.
- Cada navio inicia sua rota em uma "posição inicial" e termina em uma "posição final", sem carga em ambos os casos. A "posição inicial", para cada navio, sempre será localizada num ponto conhecido (num terminal ou numa plataforma). Do ponto de vista prático, esta posição pode ser facilmente estimada independentemente da operação que o navio esteja realizando. Caso o navio esteja carregado, basta estimar o momento que ele estiver vazio e pronto pra operar no terminal o qual fará a descarga.
- O tempo de serviço na plataforma é definido como o tempo necessário para o navio amarrar, conectar, bombear, desconectar e desamarrar. No terminal, o tempo de serviço é definido como o tempo necessário para o navio manobrar para entrar, conectar, bombear, desconectar e manobrar para sair em direção a área de fundeio. Assim, estes tempos variam em função do tamanho do alívio.

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

- A programação a ser cumprida já tem definido quais os volumes de cada alívio e a denominação do lote a qual o alívio pertence. Ou o lote de exportação é formado por um único alívio, ou é formado por dois alívios da mesma plataforma ou de plataformas diferentes. Quando é formado por dois alívios, recebem a mesma denominação (*tag*).

Os conjuntos e parâmetros são dados na Tabela 1:

Tabela 1: Conjuntos e parâmetros.

Símbolo	**Descrição**
K	Conjunto formado pelos navios, sendo k o índice de cada navio (k ∈ K).
a	Representa o número de alívios (pares coleta/entrega).
$P = \{1, 2, ..., a\}$	Conjunto formado pelas plataformas (onde coleta).
$D = \{1+a, 2+a, ..., 2a\}$	Conjunto formado pelos terminais (onde entrega).
$ST = \{s_1, ..., s_k\}$	Conjunto formado pelas posições iniciais de cada navio.
$EN = \{en_1, ..., en_k\}$	Conjunto formado pelas posições finais de cada navio.
TG	Conjunto de lotes de exportação formados por um único alívio ($TG \subset P$).
$N = P \cup D \cup ST \cup EN$	Conjunto de todos os pontos operacionais.
$A=\{(i,j) : i,j \in N\}$	Representa todos os arcos que ligam os pontos operacionais entre si.
t_{ij}	Representa o tempo de deslocamento do nó i para o nó j (d).
d_i	Representa o tempo de serviço no nó i (d).
$[e_i, l_i]$	Representa a janela de tempo no nó i, com início em e_i e fim em l_i.
Cap_k	Representa a capacidade de transporte do navio k (milhões de barris).
q_i	Representa o volume aliviado no nó i (milhões de barris) e entregue no nó (i+a). Foi adotada a convenção, $q_i = -q_{i+a}$.
cm_k	Representa o consumo do navio k navegando (ton *bunker*/mi navegada).
v_k	Representa a velocidade do navio k navegando (knots).
$dist_{ij}$	Representa a distância entre o nó i e o nó j (mi).
tag_r	Representa o lote de exportação r (formado por um ou dois alívios).
cb	Representa o custo do *bunker* (US$).
esp	Representa o tempo máximo em que há obrigatoriedade do mesmo navio aliviador esperar o segundo alívio do mesmo lote (d).
M	Representa um número suficientemente grande.

As variáveis utilizadas são dadas na Tabela 2:

Tabela 2: Variáveis.

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

Neste trabalho, a função objetivo (1) minimiza exclusivamente o somatório dos custos relacionados ao consumo de *bunker* em função das distâncias percorridas. Todos estes navios ou pertencem a frota própria da empresa ou são contratados por tempo na modalidade TCP (*time charter party*), logo os custos de investimento ou aluguel não se aplicam a nenhum fator dentro da função objetivo. Também não foram levados em consideração os custos de atracação.

$$Min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} cm_k \; dist_{ij} \; cb \; x_{ijk} \tag{1}$$

As restrições e as variáveis de decisão do modelo são dadas por:

$$\sum_{j \in (P \cup D \cup EN)} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \qquad \forall i \in (ST \cup P \cup D) \tag{2}$$

$$\sum_{i \in (ST \cup P \cup D)} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \qquad \forall j \in (P \cup D \cup EN) \tag{3}$$

$$\sum_{j \in (P \cup en_k)} x_{s_k jk} = 1 \qquad \forall\, k \in K \qquad (4)$$

$$\sum_{i \in (s_k \cup D)} x_{ien_k k} = 1 \qquad \forall\, k \in K \qquad (5)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 0 \qquad \forall j \in ST \qquad (6)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 0 \qquad \forall i \in EN \qquad (7)$$

$$\sum_{i \in (P \cup D \cup s_k)} x_{ihk} - \sum_{j \in (P \cup D \cup en_k)} x_{hjk} = 0 \qquad \forall h \in P \cup D;\ \forall k \in K \qquad (8)$$

$$e_i \left(\sum_{j \in N} x_{jik} \right) \leq B_{ik} \leq l_i \left(\sum_{j \in N} x_{jik} \right) \qquad \forall i \in (P \cup D \cup EN);\ \forall k \in K \qquad (9)$$

$$e_i \left(\sum_{j \in N} x_{s_k jk} \right) \leq B_{s_k k} \leq l_i \left(\sum_{j \in N} x_{s_k jk} \right) \qquad \forall\, s_k \in ST;\ \forall k \in K \qquad (10)$$

$$B_{a+j,k} \geq B_{j,k} \qquad \forall j \in P;\ \forall k \in K \qquad (11)$$

$$B_{jk} \geq B_{ik} + t_{ij} + d_i + (x_{ijk} - 1)\, M \qquad \forall i \in (ST \cup P \cup D);\ \forall j \in (P \cup D \cup EN);\ \forall k \in K \qquad (12)$$

$$Q_{jk} \geq Q_{ik} + q_j + (x_{ijk} - 1)\, M \qquad \forall k \in K,\ \forall i \in (ST \cup P \cup D);\ \forall j \in (P \cup D \cup EN) \qquad (13)$$

$$\sum_{i \in (ST \cup P \cup D)} x_{ihk} = \sum_{j \in N} x_{j,a+h,k} \qquad \forall h \in P;\ \forall k \in K \qquad (14)$$

$$Q_{jk} \leq Cap_k \sum_{i \in (s_k \cup P \cup D)} x_{ijk} \qquad \forall k \in K;\ j \in (P \cup D \cup en_k) \qquad (15)$$

$$Q_{s_k k} + Q_{en_k k} = 0 \qquad \forall k \in K; \qquad (16)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \qquad \forall i \in P;\ j \in P;\ (tag_i = tag_j)\ e\ (i \neq j)\ e\ (|(e_i - e_j)| \leq esp)\ e\ (e_j > e_i); \qquad (17)$$

$$\sum_{k \in K} x_{j,i+a,k} = 1 \qquad \forall i \in P;\ j \in P;\ (tag_i = tag_j)\ e\ (i \neq j)\ e\ (|(e_i - e_j)| \leq esp)\ e\ (e_j > e_i); \qquad (18)$$

$$\sum_{k \in K} x_{i+a,j+a,k} = 1 \qquad \forall i \in P;\ j \in P;\ (tag_i = tag_j)\ e\ (i \neq j)\ e\ (|(e_i - e_j)| \leq esp)\ e\ (e_j > e_i); \qquad (19)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \qquad \forall\, i \in TG\ e\ (j = i + a); \qquad (20)$$

$$Q_{ik} \geq 0 \qquad \forall i \in N;\ \forall k \in K \qquad (21)$$

$$B_{ik} \geq 0 \qquad \forall i \in N;\ \forall k \in K \qquad (22)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in (ST \cup P \cup D);\ \forall j \in (P \cup D \cup EN);\ \forall k \in K \qquad (23)$$

As Restrições (2) e (3) garantem que todos os pontos operacionais sejam visitados exatamente uma vez, com o arco saindo de *i* e chegando em *j*. A Restrição (4) obriga que todos os navios saiam de sua posição inicial e se desloquem para uma coleta (plataforma) ou para sua posição final, enquanto (5) obriga que todos os navios cheguem em um destino (terminal) ou na sua posição final. A combinação destas duas restrições permite que um ou mais navios se desloquem da posição inicial diretamente para a posição final sem fazer qualquer alívio. Essa possibilidade é importante, pois os navios com maior consumo ou posicionados inicialmente num local mais distante tendem a ser menos utilizados, permitindo que o programador do dia-a-dia tenha a visão da capacidade e/ou ociosidade de sua frota. Na Restrição (6) há a garantia que o navio saia de seu ponto inicial e não retorne, enquanto que em (7) há a garantia que o navio chegue no seu ponto final e não retorne. Em (8) há a conservação dos fluxos dos navios.

As Restrições (9) e (10) conjuntamente garantem que as janelas de tempo sejam respeitadas desde o ponto inicial até o ponto final, enquanto que em (11) a coleta deve ser realizada antes da entrega. Em (12), temos que o momento de chegada em *j* deve ser maior que o momento de saída em *i* somados o tempo de deslocamento do arco (*i,j*) mais o tempo de serviço em *i*.

A Restrição (13) se refere ao balanço de carga dos navios. A Restrição (14) garante que o navio que coletou carga em uma plataforma *h*, faça a descarga no terminal respectivo ($h+a$) e em (15) é respeitada a capacidade máxima de carregamento de cada navio. Em (16) assegura-se que os navios iniciam e terminam suas rotas vazios.

A Restrição (17) está relacionada a formação de um lote de exportação a partir de dois alívios consecutivos. Neste caso, teremos o mesmo tag_r para dois alívios distintos. Caso a diferença de tempo entre a abertura de uma janela e outra seja menor que um tempo de espera mínimo (*esp*), haverá obrigatoriedade de o mesmo navio fazer o alívio das duas cargas. Sempre que esta diferença de tempo for menor que 2 ou 3 dias, é vantajoso que o mesmo navio aguarde pelo alívio da segunda parcela do lote (neste estudo, *esp* foi fixado em 2 dias). Isso se dá pelos longos tempos de navegação e de serviço envolvidos e pelas vantagens já elencadas de fazer o transbordo no terminal de exportação de um lote utilizando o mesmo aliviador, mesmo quando provenientes de dois alívios distintos. Normalmente este tempo é definido pelo programador com base na sua experiência e eventos externos que possam impactar na programação (mau tempo, por exemplo). Para que não ocorram problemas de perdas reais de janela de tempo, sempre o primeiro alívio do navio será aquele mais cedo na linha do tempo, enquanto que o segundo alívio será sempre o posterior. As Restrições (18) e (19) são cortes implementados nesta modelagem para reforçar o conceito de precedência imposto na Equação (14) no que se refere a um lote formado por dois alívios, restringindo o conjunto de soluções e assim proporcionando um ganho de desempenho no algoritmo. A Restrição (20) também é um corte adicional que trata especificamente de lotes formados por um único alívio e obriga que a coleta e entrega seja prontamente executada por um dos navios disponíveis. O critério utilizado é a existência de um tag_r único no conjunto de alívios.

A variável Q_{ik} (21) indica a carga carregada no navio *k* após visita em *i* e a variável B_{ik} (22) indica o início do serviço em *i* pelo navio *k*. Ambas devem ser não-negativas, enquanto que a variável x_{ijk} (23) assume o valor 1 se o navio *k* percorre o arco (*i,j*); ou, assume 0, caso contrário.

Para simplificar a resolução do problema (diminuir o tamanho da relaxação linear), foram fixadas algumas variáveis e eliminados alguns arcos infactíveis [Furtado et al. 2016], conforme Tabela 3. A fixação do item 17 é exclusiva para o processo de alívios para exportação de petróleo.

Tabela 3: Fixação de variáveis.

	Fixação	**Descrição**
1)	$x_{ijk} = 0, \forall i \in ST, j \in N, k \in K \; e \; i \neq s_k$	Evita que os navios se desloquem entre suas posições iniciais.
2)	$x_{ijk} = 0, \forall j \in EN, i \in N, k \in K \; e \; i \neq en_k$	Evita que os navios se desloquem entre as posições finais.

3)	$x_{a+i,i,k} = 0, \forall i \in P \; e \; k \in K$	Evita que o navio passe antes pela entrega da respectiva coleta.
4)	$x_{ijk} = 0, \forall i \in N, j \in D, k \in K \; e \; i = s_k$	Evita que o navio vá vazio para uma entrega.
5)	$x_{ijk} = 0, \forall i \in P, j \in N, k \in K \; e \; j = en_k$	Evita que o navio vá de uma coleta diretamente para o depósito final.
6)	$x_{ijk} = 0, \forall i \in N, j \in N, k \in K \; e \; i = j$	Evita que o navio vá de um ponto para este mesmo ponto.
7)	$x_{ijk} = 0, \forall i \in N, j \in N, k \in K,$ $se \; e_i + d_i + t_{ij} > l_j \; e \; dist_{ij} \neq 0$	Evita que navios se desloquem para janelas a qual não conseguem chegar a tempo.
8)	$Q_{ik} = 0, \forall i \in ST \; e \; k \in K$ $Q_{ik} = 0, \forall i \in EN \; e \; k \in K$	Garante que os navios comecem e terminem suas rotas vazios.
9)	$B_{ik} = e_i, \forall i \in ST, k \in K \; e \; i = s_k$	Garante que os navios saiam no início da janela de tempo de suas posições iniciais.
10)	$x_{ijk} = 0, \forall i \in D, j \in D, k \in K \; e \; (-q_i - q_j) > Cap_k$ $x_{ijk} = 0, \forall i \in P, j \in p, k \in K \; e \; (q_i + q_j) > Cap_k$	Evita que navios se desloquem entre pontos operacionais onde a coleta ou entrega superam sua capacidade.
11)	$x_{ijk} = 0, \forall i \in ST, j \in ST \; e \; k \in K$ $x_{ijk} = 0, \forall i \in EN, j \in EN \; e \; k \in K$	Evita que os navios saiam de sua posição inicial/final e se desloquem para a posição inicial/final de outro navio.
12)	$x_{ijk} = 0, \forall i \in ST, j \in EN, k \in K \; \; e$ $j \neq (i + 2a + /K/)$	Evita que um navio se desloque de sua posição inicial para a posição final de outro navio.
13)	$x_{ijk} = 0, \forall i \in P, j \in EN, k \in K$ $e \; k \neq (i - 2a - /K/) \; e \; i \neq (j - 2a - /K/)$	Evita o deslocamento das coletas para as posições finais.
14)	$x_{ijk} = 0, \forall j \in ST, i \in N \; e \; k \in K$	Evita o retorno para as posições iniciais.
15)	$x_{ijk} = 0, \forall i \in EN, j \in N \; e \; k \in K$	Evita a saída das posições finais.
16)	$x_{jik} = 0, se \; i \in P \cup D, j \in P \cup D, k \in K \; \; e \; e_j > l_i$	Evita o deslocamento para janelas já fechadas.
17)	$x_{jik} = 0, \forall i \in TG, k \in K \; e \; \; j = i + a$	Evita deslocamento no sentido terminal-plataforma quando o carregamento é de um lote único no sentido plataforma-terminal.

6. Resultados Computacionais

O modelo proposto foi resolvido utilizando-se a linguagem de programação Julia, versão 1.0.5, a biblioteca JuMP, versão 0.21.1 e o solver Gurobi 9.0.2. Para o processamento foi utilizado uma estação com um processador Intel Core i7-8700K, com CPU 3.7 GHz e 64 GB de memória RAM (habilitado apenas um núcleo para a resolução). Foram testados quatro meses de programação real, conforme dados constantes na Tabela 4:

Tabela 4: Dados utilizados nos experimentos computacionais.

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

A Tabela 5 mostra os resultados dos experimentos computacionais, dando ênfase para a primeira solução factível encontrada e a melhor solução encontrada num tempo de processamento limitado a 600 segundos. Este tempo foi arbitrado para representar um tempo razoável de espera que um programador pode aguardar por uma resposta de um modelo dentro da sua rotina de trabalho.

Tabela 5: Resultados dos experimentos computacionais.

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

A função objetivo considera o custo do *bunker* em US$ 500,00 por tonelada (*Rio de Janeiro VLSFO max 0.5% Price* – média de Jan/20 a Mar/20 [Oil Monster 2020]). A diferença entre a função objetivo na melhor solução encontrada em 600 segundos e na primeira solução factível encontrada é diretamente o valor economizado em *bunker*, quando se considera a utilização das rotas da melhor solução. É uma economia mensal da ordem de US$ 25 mil para o mês 3 e US$ 43 mil para o mês 4. Os quatro meses somam uma economia de mais de US$ 93 mil, valor este considerável economicamente, além do benefício ambiental em navegar menos e utilizar primeiramente os navios mais eficientes energeticamente. No mês 2, a primeira solução foi encontrada utilizando-se 5 navios para fazer os alívios, enquanto que a solução melhorada (*gap* igual a zero em 191 segundos de processamento), utilizou apenas 3 navios, deixando dois navios menos eficientes parados e mostrando o ganho que estes modelos podem trazer. É importante ressaltar que por muitas vezes apenas ter como resposta a indicação de que uma programação é factível já é suficiente para economizar milhares de dólares, evitando-se previamente o deslocamento desnecessário de navios. A aplicabilidade do modelo na rotina se mostra viável, já que tempo de processamento para encontrar a primeira solução factível variou entre 11 e 342 segundos e respostas melhores podem ser obtidas a depender da disponibilidade de tempo do programador.

A Tabela 6 mostra os resultados dos experimentos computacionais relacionados às Restrições (18), (19) e (20), buscando demonstrar a necessidade destas restrições para diminuir o tempo computacional de resolução deste problema e viabilizar o uso deste modelo na rotina de um programador de navios. Conforme mencionado anteriormente, a Restrição (17) está relacionada à formação de um lote de exportação a partir de dois alívios consecutivos e não pode ser suprimida. O tempo máximo de processamento destes testes foi limitado em 3600 segundos.

Tabela 6: Impacto no tempo de processamento com e sem as Restrições (18), (19) e (20).

Mês	Primeira solução factível encontrada			Primeira solução factível encontrada, quando suprimidas as restrições (18), (19) e (20)		
	FO (US$)	GAP (%)	Tempo (s)	FO (US$)	GAP (%)	Tempo (s)
1	504.725	18,5	17	-- (*)	-- (*)	-- (*)
2	459.590	21,2	16	471.070	32.3	124
3	571.095	16,8	11	-- (*)	-- (*)	-- (*)
4	839.570	20,0	342	839.570	20.0	248

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

7. Conclusões

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

No dia-a-dia da programação de navios aliviadores, esta frota trabalha quase que exclusivamente no processo de transporte do petróleo das plataformas de produção para navios que farão a rota de exportação. Para lotes compostos de dois alívios, sempre é importante utilizar o

mesmo aliviador para buscar otimizar o tempo demandado e as manobras no terminal de transbordo. Para que esse processo tenha êxito, muitas vezes, apenas ter como resposta a indicação que uma programação é factível já é suficiente para economizar milhares de dólares, evitando previamente o deslocamento desnecessário de navios. A facilidade de se ter um modelo para rapidamente testar diferentes tamanhos de janelas, deslocamentos das janelas existentes, mudança de plataforma de alívio, alterações nas posições iniciais dos navios, a colocação ou retirada de navios, entre outras possibilidades, impacta enormemente e positivamente o trabalho da área de programação. Os questionamentos diversos do dia-a-dia podem ser respondidos com mais facilidade, segurança e com embasamento técnico. Novos cenários, por exemplo, gerados a partir de mudanças nas condições climáticas na área de produção, são muito relevantes na tomada de decisão, quando se trabalha com navios de grande capacidade e altíssimo custo operacional.

Embora as programações utilizadas nos cenários estudados fossem reais da empresa, a roteirização propriamente dita (nomeação dos navios que executarão os alívios) é feita manualmente para um horizonte máximo de 7 a 10 dias. Logo, não há dados suficientes para comparar com a programação testada nos cenários, que corresponde a 30 dias. Essa programação também é atualizada com muita frequência em função das incertezas nas operações desta natureza e um algoritmo para rapidamente refazer a programação é muito positivo.

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

8. Agradecimentos

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

9. Referências Bibliográficas

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2019). Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2019. Web page http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/2019-anuario-versao-impressao.pdf. Acessado: 2020-04-20.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2020a). SIGEP - Previsão de Produção. Web page http://app.anp.gov.br/anp-cpl-web/public/sigep/consulta-previsao-producao/consulta.xhtml. Acessado: 2020-04-20.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2020b). Dados Estatísticos. Web page http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos. Acessado: 2020-04-20.

ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2019). Anuário Estatístico 2019. Web page http://portal.antaq.gov.br/wp-content/uploads/2020/02/Anuário-2019-vFinal-revisado.pdf. Acessado: 2020-04-20.

Baldacci, R., Bartolini, E., Mingozzi, A., & Roberti, R. (2010). An exact solution framework for a broad class of vehicle routing problems. *Computational Management Science*, *7*(3): 229-268.

Braekers, K., Ramaekers, K., Nieuwenhuyse, I., V. (2016). The vehicle routing problem: state of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99: 300–313.

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

Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., Ronen, D. (2013). Ship routing and scheduling in the new millennium. *European Journal of Operational Research*, 228: 467-483.

Christiansen, M., Fagerholt, K., Ronen, D. (2004). Ship Routing and Scheduling: Status and Perspectives. *Transportation Science*, 38: 1-18.

Clarke, G., Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12: 568–582

Cordeau, J. F., Laporte, G., Potvin, J. Y., Savelsbergh, M. W. P. (2007) Transportation on Demand. Em: Handbooks in Operations Research and Management Science. Barnhart, C., Laporte, G., (eds). Elsevier, 14:429–466.

Dantzig, G. B., Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6:80–92.

Dumas, Y., Desrosiers, J. e Soumis, F. (1991). The pickup and delivery problem with time windows. *European Journal of Operational Research,* 54:7-22.

EIA - U.S. Energy Information Administration (2020). Petroleum and other liquids. Web page https://www.eia.gov/international/data/world/petroleum-and-other-liquids/annual-refined-petroleum-products-consumption. Acessado: 2020-04-20.

Furtado, M. G. S. (2016). O problema de roteamento e programação de navios com coleta e entrega na indústria de petróleo: modelagem e métodos de solução exatos. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos.

Gendreau, M., Potvin, J.-Y., Braysy, O., Hasle, G., & Lokketangen, A. (2008). Metaheuristics for the vehicle routing problem and its extensions: A categorized bibliography. Em: Golden B., Raghavan S., Wasil E. (eds) The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. Operations Research/Computer Science Interfaces, vol 43.

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

Oil Monster (2020). Rio de Janeiro VLSFO max 0.5% Price. Web page https://www.oilmonster.com/bunker-fuel-prices/rio-de-janeiro-vlsfo-max-05-price/219/143. Acessado: 2020-04-20.

PPSA – Pré-Sal Petróleo S.A. (2019). Results estimate of production sharing contracts. Web page http://www.presalpetroleo.gov.br/ppsa/conteudo/ebook_12_12.pdf. Acessado: 2020-04-20.

Rodrigues, V. P., Morabito, R., Yamashita D., Silva, B. J. V. e Ribas P. C. (2016). Ship Routing with Pickup and Delivery for a Maritime Oil Transportation System: MIP Model and Heuristics. *Systems 2016*, n. 4, 31.

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

Savelsbergh., M. W. P., Sol, M. (1995). The general pickup ang delivery problem. *Transportation Science* 29(1):17-29.

Wilson, N., Sussman, J., Wang, H. and Higonnet, B. (1971). Scheduling algorithms for dial-a-ride systems. Urban Systems Laboratory Report USL TR-70-13, M.I.T., Boston.

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