

UM MODELO MATEMÁTICO PARA O ROTEAMENTO DE NAVIOS ALIVIADORES NO ESCOAMENTO DA PRODUÇÃO DE PETROLÉO

A MATHEMATICAL MODEL FOR THE ROUTING OF SHUTTLE TANKERS IN THE FLOW OF OIL PRODUCTION

UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL ENRUTAMIENTO DE LOS BUQUES CISTERNA EN EL FLUJO DE LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO

Edwin Benito Mitacc Meza¹, Dalessandro Soares Vianna², Alan Alves de Macedo³, Marcilene de Fátima Dianin Vianna⁴

RESUMO

O crescente aumento de investimentos nas atividades *offshore* de petróleo tem promovido uma verdadeira corrida contra o tempo para se desenvolver toda a cadeia produtiva do setor. Neste cenário, as atividades de apoio logístico têm desafiado os gestores a buscarem alternativas que possam reduzir os custos operacionais e, ao mesmo tempo, aumentar o nível de serviço oferecido. Dentre estas atividades, a construção de roteiros de uma frota de navios aliviadores para o escoamento da produção de plataformas tipo FPSO/FSO, tem sido uma das atividades importantes e complexas, devido ao aumento da demanda e dos

custos envolvidos no serviço prestado. Neste artigo é proposto um modelo matemático para auxiliar na programação e elaboração dos roteiros dos navios disponíveis para esta atividade. Alguns resultados preliminares são apresentados, de forma a validar o modelo proposto.

Palavras-chave: Roteirização, Programação inteira mista; Logística *Offshore*.

ABSTRACT

The increasing investment in offshore oil activities has promoted a race against time to develop all the production chain. In this scenario, the logistical support activities have challenged managers to seek alternatives that can reduce operating costs and at the same time increase the level of service offered. Among these activities, the construction of routes of a fleet of shuttle tankers for transporting the production of FPSO/FSO type platforms has been one of the important and complex activities, due to increased

¹ Doutor em Ciência da Computação pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Professor Adjunto da UFF. emitacc@id.uff.br.

² Doutor em Informática pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Professor Adjunto da UFF. dalessandrosoares@yahoo.com.br.

³ Engenheiro de Produção pela UFF. alanmacedo@hotmail.com. O artigo em questão é consequência do Projeto Final de Graduação deste autor.

⁴ Doutora em Ciências Naturais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). Professora Adjunta da UFF. marcilenedianin@gmail.com.

demand and costs involved in service. This paper introduces a mathematical model to assist in the planning and preparation of the scripts of ships available for this activity. Some preliminary results are presented in order to validate the model.

Descriptors: Routing, Mixed-Integer Programming, Offshore Logistics.

RESUMEN

El creciente aumento de inversiones en las actividades petroleras en alto mar ha impulsado una carrera contra el tiempo para mejorar toda la cadena de producción de petróleo. En este escenario, las actividades de apoyo logístico han desafiado a gerentes a buscar alternativas que puedan reducir los costos de operación y al mismo tiempo aumentar el nivel de servicio ofrecido. Entre estas actividades, la construcción de rutas de una flota de buques cisterna para el transporte de la producción de plataformas del tipo FPSO/FSO ha sido una de las actividades más importantes y complejas, debido al aumento de la demanda y los costos involucrados en el servicio. Este trabajo presenta un modelo matemático para ayudar en la planificación y preparación de las rutas de las embarcaciones disponibles para

esta actividad. Algunos resultados preliminares son mostrados con el fin de validar el modelo.

Palabras-Claves: Enrutamiento; Programación entera mixta; Logística *Offshore*.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, devido às descobertas de grandes reservas de óleo e gás na camada de pré-sal na costa brasileira, houve um aumento de investimentos nas atividades de Exploração e Produção de petróleo, sobretudo *offshore*. Isso tem promovido uma verdadeira corrida contra o tempo para desenvolver toda a cadeia produtiva do setor, de forma a atender o forte crescimento da demanda por produtos e serviços.

Isto pode ser comprovado com os dados da estatal brasileira de petróleo, a Petrobras, que afirma ter atualmente mais de 100 plataformas de produção, 16 refinarias, 30 mil quilômetros em dutos e mais de 6000 postos de combustíveis (PETROBRAS, 2013).

No entanto, operações no segmento *offshore*, sobretudo no Brasil, vêm sendo realizadas em ambientes cada vez mais complexos e desafiadores devido a diversos fatores como: maiores profundidades do oceano e

reservatórios, maiores distâncias da costa, condições meteorológicas e oceânicas mais agressivas, maiores pressões e temperaturas dos fluidos, etc. Assim, operar em ambiente como este, tem-se tornado um desafio, principalmente quando se quer oferecer um nível adequado de atendimento nas operações logísticas ao longo da cadeia de suprimentos.

É importante ressaltar que a cadeia de suprimentos da exploração de petróleo *offshore* é bastante extensa, começando pelo apoio prestado às atividades de sísmica, a parte de *drilling* e construção e instalação das plataformas, as quais demandam transporte de equipamentos e maquinários extremamente pesados, bem como ferramentas, peças, tubos de produção, diversos tipos de fluidos e obviamente, pessoas que farão com que tudo aconteça.

Após a instalação física, começa a operação propriamente dita da plataforma que novamente demanda grande quantidade de apoio logístico. Neste caso, é preciso o fornecimento de alguns insumos como: produtos químicos, água, alimentos, diesel, fluidos específicos e, quando necessário, peças e equipamentos para a manutenção das unidades.

O papel da logística não pára por aí. A etapa seguinte é escoar a produção de óleo, que normalmente é bastante elevada, para locais apropriados, que são os terminais marítimos, onde passará por controle de qualidade e enquadramento. O óleo que não precisa passar pelo processo anteriormente citado, é exportado diretamente da plataforma.

Assim, do início ao fim do processo, se faz uso intenso da logística. Porém, nos últimos anos, devido à crescente demanda do petróleo e de seus derivados, o mercado tem se tornado cada vez mais competitivo, levando as empresas a buscarem estratégias de organizar suas atividades, procurando um melhor resultado logístico.

Dentre as diversas tomadas de decisão no âmbito logístico, a indústria do petróleo encontra-se com um dilema a ser solucionado no processo de escoamento da produção. Este dilema consiste em decidir qual o melhor percurso que os navios tanques devem fazer das plataformas produtoras até os terminais marítimos (portos) e destes terminais para algumas refinarias que não são alimentadas por óleos transportados via modal dutoviária. Isso deve ser decidido de modo a minimizar custos e tempo, bem como, do ponto de vista do cliente, cumprir com as

necessidades e demandas dos centros consumidores.

Embora o estudo da logística *offshore* seja de grande relevância, têm-se encontrado na literatura poucos trabalhos realizados sobre escoamento de petróleo no Brasil, dos quais se pode destacar os trabalhos realizados por Ono (2007), Ribeiro e Iachan (2009), Muract *et al.* (2010), Pucu (2011) e Hentzy *et al.* (2012).

Cabe ressaltar que, no âmbito do Brasil, a maioria das plataformas *offshore* em operação são unidades flutuantes de exploração que produzem e armazenam o petróleo bruto, chamados FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*).

Assim, à medida que vai se armazenando a produção nos tanques do FPSO, chega-se a um determinado nível no qual é preciso escoar essa produção de forma a não atingir a capacidade máxima de armazenagem, evitando assim a parada da produção. Desta forma, o óleo armazenado é retirado ou descarregado de tempos em tempos, através de bombeio para navios aliviadores (*Shuttler Tanker*) – processo chamado de *Offloading*.

Neste contexto, o presente trabalho tem como foco a construção de um modelo matemático para definir o tamanho da frota e também as rotas dos

navios aliviadores para atender um conjunto de plataformas, de forma a reduzir o tempo de percurso bem como garantir o escoamento da produção.

Este problema pode ser caracterizado como um problema clássico de Roteirização de Veículos com Janela de Tempo (VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*), que consiste em determinar um conjunto de rotas com o menor custo possível, iniciando e terminando sempre no mesmo terminal marítimo, de modo que todas as demandas nos nós (plataformas) sejam atendidas em uma janela específica de tempo. Quando a definição dos roteiros envolve aspectos temporais, este problema é também denominado roteamento e programação de veículos. A literatura sobre esta classe de problema é vasta, na qual se pode destacar os trabalhos de Bodin e Golden (1981), Solomon (1987), Riise e Stølevik (1999), De Oliveira e Vasconcelos (2008), entre outros.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Como já é sabido, as reservas de petróleo no Brasil em campo *offshore* estão cada vez mais distantes da costa e lidar com esse ambiente tem sido desafiador, uma vez que a infraestrutura para trabalhar nesse habitat precisa ser

inovadora. Nesse contexto, o primeiro maior desafio é a LDA (lâmina d'água) cada vez mais profunda. Para que a

exploração neste ambiente aconteça, outros tipos de plataformas tiveram de ser projetadas (ver Figura 1).

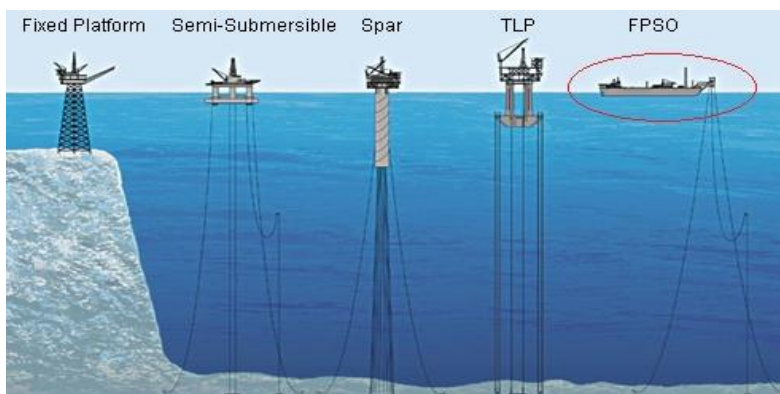


FIGURA 1 – Tipos de Plataformas de acordo com a LDA.

As plataformas construídas em leito marinho, mais próximo à costa, são as Plataformas Fixas, onde o óleo produzido geralmente é escoado diretamente para terra através de dutos ou ainda pode ser bombeado para outro tipo de plataforma localizada estrategicamente apenas para função de recebimento de petróleo.

Já com a descoberta de petróleo em lamina d'água mais profunda, foi necessário o desenvolvimento de novas técnicas de exploração. Então, surgiram as plataformas flutuantes, que são estruturas complacentes instaladas através de um sistema de ancoragem. Existem vários tipos de unidades flutuantes (Semi-Submersível, Spar, TLP e FPSO) que diferem pelo fato de produzir e armazenar petróleo, apenas produzir ou apenas armazenar.

Dentre estas, as FPSO's são unidades estacionárias flutuantes (*Floating*) que produzem (*Production*) e armazenam petróleo (*Storage*) e efetuam o escoamento (*Offloading*). Existem também plataformas semelhantes a estas, as FSO's que são unidades estacionárias flutuantes (*Floating*) que armazenam petróleo (*Storage*) e efetuam o escoamento (*Offloading*). Esse tipo de plataforma não tem capacidade de processamento de petróleo como as FPSO's, mas é muito usada no armazenamento de óleo daquelas que apenas produzem.

Estes tipos de plataformas são bastante usadas no Brasil devido ao fato de que o ambiente, onde se faz a extração de petróleo (LDA profunda), exclui a possibilidade do uso de plataformas fixas (GROVE, 2005).

O segundo maior desafio está na logística. Como a distância das unidades produtoras da costa brasileira é cada vez maior, o tempo também é maior para que a demanda por materiais, equipamentos, ferramentas e pessoas cheguem até as plataformas. Assim, para amenizar estas dificuldades, estratégias logísticas precisam ser desenvolvidas.

Assim, neste contexto tem-se intensificado o uso de navios aliviadores para fazer o escoamento da produção destas plataformas flutuantes. Porém, antes do escoamento propriamente dito, ocorre a operação de *offloading*, que é um processo de grande risco, tanto operacional quanto ambiental, em caso de derramamento de óleo. Este processo de transferência do óleo é feito por longo período através de bombas de cargas submersas no interior de cada tanque da plataforma.

Segundo Silva *et al.* (2011), cada operação de *offloading* totaliza, em média, um carregamento de 245.310 barris, cerca de 39.000 m³ de petróleo. A taxa de transferência do óleo de uma embarcação para outra é a partir de 1000 m³/h e com uma duração total de 20 a 36 horas de operação *offloading*.

Já no ambiente empresarial, se por um lado baixos níveis de estoque podem levar a perdas de economias de

escala e altos custos de falta de produtos, por outro lado, o excesso de estoques representa custos operacionais e custos de oportunidade do capital. Encontrar o melhor *trade-off* entre estes custos não é em geral uma tarefa simples.

Além disso, cabe ressaltar que funcionar com níveis altos de estoque pode comprometer o sistema de produção, podendo ocorrer um “top”, estado em que a plataforma chega à sua capacidade máxima de estoque e é preciso parar a produção. Num sistema de produção contínua, como é o caso, a parada de produção é um grande prejuízo.

Comparando as plataformas que apenas produzem e exportam com aquelas que produzem e armazenam, é fácil notar que as primeiras são mais enxutas. Isso porque o que ela produz em pouco tempo, questão de horas, já foi escoado pelas tubulações chegando bem mais rápido aos terminais marítimos e destes às refinarias com pouco estoque ao longo da cadeia. O que não acontece com as plataformas FPSO/FSO, onde o óleo fica armazenado por semanas e, para chegar aos terminais, fica armazenado por mais tempo ainda. O valor do petróleo armazenado é bastante elevado, comisso

o custo de oportunidade também é elevado.

Seguindo esse raciocínio, o ideal seria a plataforma funcionar com menor nível de estoque de produção, evitando assim os custos de oportunidades. Portanto, o escoamento com mais frequência amenizaria este tipo de custo. Para isso, o roteamento periódico pode contribuir para este fim.

Em suma, para a construção de um modelo matemático que auxilie no roteamento de navios aliviadores visando o escoamento da produção de plataformas PFSO/FSO, deve-se levar em consideração os seguintes aspectos:

- Os tipos de navios aliviadores disponíveis para o transporte de petróleo. Para o problema em questão foram identificados 3 tipos: Panamax, Aframax e Suezmax. A Tabela 1 descreve a capacidade e o custo de fretamento de cada navio;
- A localização exata dos pontos de visita dos navios aliviadores, neste caso das plataformas tipo PFSO e/ou FSO. Para isto, existe uma ferramenta computacional disponível na Petrobras, o GIS-SUB (ver Figura 2) que é um software de localização geográfica que permite

identificar a localização de cada unidade de produção e calcular as distâncias entre cada plataforma que seria atendida e também destas aos terminais;

- Os prazos máximos previstos para o escoamento da produção das plataformas, de forma a não comprometer a operação das mesmas, pois a indústria petrolífera é de produção contínua. Desta forma, busca-se evitar que o sistema de produção das unidades seja comprometido, ou seja, chegue à sua capacidade máxima, o chamado “top”, que poderá trazer grandes consequências como a parada da planta, e obviamente, prejuízos para a empresa;
- Os procedimentos da empresa em relação ao início do escoamento da produção. Assim, deve-se evitar que o navio chegue antes da data programada de forma que o volume de óleo escoado não seja menor que o programado, chamado de “praça morta”. Assim, é política da empresa forçar o navio a ficar parado esperando a data programada;

- As multas a serem pagas, caso não seja possível fazer o atendimento às plataformas dentro dos prazos estabelecidos;
- Os tempos de cada atividade no processo de escoamento da produção das plataformas,

como por exemplo o tempo de amarração, o tempo de conexão e teste dos mangotes (espécie de mangueira que liga a plataforma ao navio) e o tempo de transferência do óleo ou *offloading*.

TABELA 1 – Capacidades e Custos dos navios aliviadores.

	Panamax	Aframax	Suezmax
Capacidade (m ³)	60.000	110.000	160.000
Capacidade (bbp – barris de petróleo)	377.400	69.190	1.006.400
Taxa de afretamento (U\$\$/dia)	21.000	28.000	34.000

Fonte: PETROBRAS 2013



FIGURA 2 – Tela do software de localização geográfica – GIS-SUB.

Cabe ressaltar que fatores externos em que o ser humano não têm controle, não serão considerados. Estes

fatores externos são, na grande maioria, condições desfavoráveis de mar ocasionados por fortes chuvas ou ventos

que deixam o mar bastante agitado, comprometendo a estabilidade dos navios aliviadores durante a ancoragem.

3. FORMULAÇÃO E MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA

O problema, aqui tratado, pode ser representado por um grafo não direcionado $G(V, A)$, onde $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ é o conjunto de todos os vértices ou nós e $A = \{(v_i, v_j): v_i, v_j \in V\}$ é o conjunto de todas as arestas. Os nós podem representar o porto ou as plataformas. Cada plataforma pode apresentar diferentes demandas para serem coletadas e o porto é o ponto de

partida dos navios usados para coleta do produto nas plataformas. Neste trabalho supõe-se que existe um número limitado de plataformas e um único porto.

A cada aresta (v_i, v_j) está associada uma distância não negativa d_{ij} que representa a distância entre os vértices (porto/plataformas).

O Problema de roteamento consiste em determinar o conjunto de rotas que deverão ser feitas pelos navios aliviadores, minimizando os custos de transporte. Assim, para a formular matematicamente este problema, os seguintes parâmetros e variáveis de decisão devem ser definidos:

Parâmetros:

$V =$ conjuntodetodososnós (porto/plataformas)

$C =$ subconjuntode V querepresentasomenteasplataformas $\{2, \dots, n\}$

$K =$ conjuntodenaviosdisponíveis

$T =$ conjuntodostipos de naviosdisponíveis

$aut =$ autonomia dos navios igual a 480 Horas

$tipo_k =$ tipode navio k

$cap_t =$ capacidadedo naviotipot

$vel_t =$ capacidadedo naviotipot

$conp_t =$ consumodo naviotipotquandoparado

$conn_t =$ consumodo naviotipotquandonavegando

$dem_i =$ demandaplataformai

$e_i =$ instanteinicialdajaneladetempodaplataformai

$l_i =$ instantefinaldajaneladetempodaplataformaisempenalidade

$q_i =$ instantefinaldajaneladetempodaplataformaicompenalidade

$ta_i =$ tempodeatendimentoaplataformai

$d_{ij} =$ distânciaentreosnós i e j

$M =$ máximodeplataformasporrota

$CC =$ CustoCombustível

$CP =$ CustoPenalidade

Variáveis de decisão:

$$\begin{aligned}
 x_{ijk} &= \begin{cases} 1 & \text{indica que a aresta } (i, j) \text{ est\aa sendo usada pelo navio } k \\ 0 & \text{caso contr\aa rio} \end{cases} \\
 u_{ik} &= \begin{cases} 1 & \text{indica que a plataforma } i \text{ \aa t\aa tido pelo navio } k \\ 0 & \text{caso contr\aa rio} \end{cases} \\
 y_{ijk} &= \text{fluxo em cada aresta } (i, j) \text{ percorrido pelo navio } k \\
 tt_{ik} &= \text{tempo \aa t\aa a plataforma } i \text{ pelo navio } k \\
 td_{ijk} &= \text{tempo de deslocamento da plataforma } i \text{ para } j \text{ usando o navio } k \\
 tp_{ijk} &= \text{tempo parado entre a plataforma } i \text{ e } j \text{ usando o navio } k \\
 custo_{ijk} &= \text{custo de deslocamento da plataforma } i \text{ para } j \text{ usando o navio } k \\
 pen_i &= \text{penalidade por chegar \aa plataforma } i \text{ ap\aa s o tempo } l_i
 \end{aligned}$$

Utilizando esta notação, o problema pode ser formulado como um modelo de programação inteira mista:

$$\text{MIN} \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{\substack{j \in V \\ i \neq j}} custo_{ijk} + \sum_{i \in C} pen_i + \sum_{\substack{i \in C \\ i \neq 1}} custo_{oi}$$

s. a.

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} y_{ijk} - \sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} y_{jik} = u_{jk} \quad \forall k \in K, \forall j \in C \quad (R1)$$

$$y_{ijk} \leq M x_{ijk} \quad \forall k \in K, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (R2)$$

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} x_{ijk} = u_{jk} \quad \forall k \in K, \forall j \in C \quad (R3)$$

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} x_{jik} = u_{jk} \quad \forall k \in K, \forall j \in C \quad (R4)$$

$$\sum_{i \in C} (dem_i \times u_{ik}) \leq cap_{tipo\ k} \quad \forall k \in K \quad (R5)$$

$$\sum_{k \in K} u_{ik} = 1 \quad \forall i \in C \quad (R6)$$

$$\sum_{\substack{i \in C \\ i \neq 1}} x_{1ik} = \sum_{\substack{i \in C \\ i \neq 1}} x_{i1k} \quad \forall k \in K \quad (R7)$$

$$td_{ijk} = \left(\frac{d_{ij}}{vel_{tipo\ k}} \right) x_{ijk} \quad \forall k \in K, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (R8)$$

$$tt_{jk} \geq tt_{ik} + ta_i + td_{ijk} - (aut)(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K, \forall j \in C, \forall i \in V, i \neq j \quad (R9)$$

$$tp_{ijk} \geq tt_{jk} - tt_{ik} - td_{ijk} - ta_i - (aut)(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (R10)$$

$$custo_{ijk} \geq (conn_{tipo\ k} * CC)td_{ijk} + (conp_{tipo\ k} * CC)tp_{ijk} \quad \forall k \in K, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (R11)$$

$$custoa_i \geq \sum_{k \in K} (ta_i \times u_{ik}) \times consptipo_k \times CC \quad \forall i \in C \quad (R12)$$

$$tt_{ik} \geq e_i \quad \forall k \in K, \forall i \in C \quad (R13)$$

$$tt_{ik} \leq q_i \quad \forall k \in K, \forall i \in C \quad (R14)$$

$$pen_i \geq CP(tt_{ik} - l_i) \quad \forall k \in K, \forall i \in C \quad (R15)$$

$$x_{ijk} \in [0,1] \quad \forall k \in K, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (R16)$$

$$u_{ik} \in [0,1] \quad \forall k \in K, \forall i \in V \quad (R17)$$

$$y_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (R18)$$

$$tp_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (R19)$$

$$td_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (R20)$$

$$custo_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (R21)$$

$$tt_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall i \in V \quad (R22)$$

$$pen_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (R23)$$

$$custoa_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (R24)$$

O objetivo é minimizar os custos operacionais relacionados ao escoamento da produção (transporte e atendimento) bem como as penalidades (multas) a serem pagas caso o atendimento às plataformas esteja fora dos prazos estabelecidos. A restrição (R1) garante que a rota é conexa, ou seja, a rota começa e termina no porto. A desigualdade (R2) assegura que o fluxo na aresta (i, j) só poderá ocorrer se a aresta (i, j) esta sendo usada por algum navio. A restrição (R3) garante que, deve haver exatamente uma aresta chegando no nó j vindo do navio k , caso j seja atendida por k . Já a restrição (R4) garante que deve haver exatamente uma aresta saindo do nó j . A

desigualdade da restrição (R5) assegura que a demanda coletada pelo navio k deve ser compatível à sua capacidade. A igualdade da restrição (R6) indica que uma plataforma i deverá ser atendida por um único navio k . A restrição (R7) assegura que o navio irá retornar para o terminal, ou seja, se o navio sai do porto, então ele deve voltar ao porto. A equação (R8) calcula o tempo de deslocamento entre os nós i e j pelo navio k . A desigualdade (R9) garante que o tempo até a plataforma j não deve ser menor que o tempo até sua antecessora i , adicionando os tempos de deslocamento e o tempo no atendimento a plataforma i . A restrição (R10) calcula o tempo parado entre os nós i e j , caso o

navio precise aguardar para o atendimento da plataforma i . A restrição (R11) calcula o custo no arco (i, j) . A restrição (R12) calcula o custo de atendimento da plataforma i . A restrição (R13) assegura que o navio deve respeitar o prazo inicial de atendimento, ou seja, não deve chegar antes do tempo preestabelecido. A restrição (R14) assegura que o navio deve atender a janela máxima de tempo, ou seja, não deve chegar após o tempo preestabelecido para evitar multas por atraso. A desigualdade (R15) verifica se o navio chegou numa determinada plataforma depois do prazo sem penalidade. As restrições (R16) e (R17) representam o domínio adequado das variáveis binárias. Já as restrições (R18), (R19), (R20), (R21), (R22), (R23) e (R24) são restrições de não negatividade.

4. TESTES COMPUTACIONAIS PARA VALIDAÇÃO DO MODELO

4.1. Construção dos Cenários de Testes

Com o objetivo de testar e validar o modelo matemático proposto foram construídos vários cenários distintos para o problema em questão. Os dados utilizados foram obtidos de um banco de dados com informações reais de demanda, capacidade dos navios, localização das unidades de produção e também dos portos, entre outras informações.

Primeiramente, foram definidos os dados da Tabela 2, que serão considerados parâmetros constantes para qualquer cenário aqui proposto, isso porque estas informações estão relacionadas a cada tipo de navio aliviador utilizado.

TABELA 2 – Parâmetros fixos

Tipos de Navios	Panamax	Aframax	Suezmax
Capacidade (m ³)	60.000	110.000	160.000
Velocidade (km/h)	20	22	24
CONSP (R\$/h)	441	496	551
CONSD (R\$/h)	4.412	5.614	7.599
Autonomia(h)	480	480	480

O parâmetro CONSP se refere ao consumo do navio quando este

estiver parado, seja esperando algum atendimento ou mesmo quando estiver

fazendo o *offloading*. Isso porque estes navios precisam ter posicionamento dinâmico, ou seja, seus motores ficam acionados para que o navio não saia do posicionamento estabelecido. Já o parâmetro CONSD se refere ao consumo do navio navegando. O parâmetro autonomia se refere ao tempo total em que o navio pode ficar em alto-mar para evitar que falte combustível durante o percurso.

As localizações das plataformas e navios foram obtidas através do programa desenvolvido pela Petrobras, chamado GIS-SUB, sendo utilizadas coordenadas UTM (N, E).

A seguir são descritos cada um destes cenários e os dados que servirão de entrada no modelo matemático, para a realização dos testes em ambiente computacional.

Cenário 1: Neste cenário foram consideradas 07 (sete) plataformas para serem atendidas, com as respectivas produções escoadas para o porto/terminal de Angra dos Reis. Como entrada do modelo, foi informado a demanda de cada plataforma e também o tempo de atendimento de cada uma delas, ver Tabela 3. Entende-se por tempo de atendimento a soma do tempo de amarração, tempo de conexão e teste dos mangotes (espécie de mangueira que liga a plataforma ao navio) e o tempo de transferência do óleo ou *offloading*. Além do tempo de atendimento, foi informado também o tempo mais cedo da chegada do navio na plataforma, o tempo máximo em que não acarreta multa por atraso e também o tempo limite, ou seja, o tempo em que a plataforma atinge sua capacidade máxima de armazenagem.

TABELA 3 – Parâmetros específicos de cada plataforma (Cenário 1)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Demanda (m ³)	49.000	36.000	47.000	79.000	36.000	71.000	67.000
Tempo de atendimento (h)	19	15	18	28	15	25	24
Tempo mais cedo (h)	10	10	10	10	10	10	10
Tempo sem multa (h)	120	40	83	64	104	53	41
Tempo limite (h)	229	70	157	118	197	95	73

Cenário 2: Neste cenário foram consideradas 09 (nove) plataformas para serem atendidas com as respectivas produções escoadas para o terminal de Angra dos Reis. A demanda das

unidades de produção e os respectivos tempos de atendimento bem como os tempos estimados para a chegada do navios encontram-se na Tabela 4.

TABELA 4 – Parâmetros específicos de cada plataforma (Cenário 2)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Demanda (m ³)	49.000	36.000	47.000	79.000	36.000	71.000	67.000	81.000	45.000
Tempo de atendimento (h)	19	15	18	28	15	25	24	28	18
Tempo mais cedo (h)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tempo sem multa (h)	120	40	83	64	104	53	41	60	102
Tempo limite (h)	229	70	157	118	197	95	73	111	194

Cenário 3: Neste cenário foram consideradas 10 (dez) plataformas a serem atendidas, com as respectivas

produções escoadas para o terminal de Angra dos Reis. As informações em relação a este cenário encontram-se na Tabela 5.

TABELA 5 – Parâmetros específicos de cada plataforma (Cenário 3)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Demanda (m ³)	49.000	36.000	47.000	79.000	36.000	71.000	67.000	81.000	45.000	43.000
Tempo de atend. (h)	19	15	18	28	15	25	24	28	18	17
Tempo mais cedo (h)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tempo sem multa (h)	120	40	83	64	104	53	41	60	102	142
Tempo limite (h)	229	70	157	118	197	95	73	111	194	274

Cenário 4: Neste cenário foram consideradas 12 (doze) plataformas a serem atendidas, com as respectivas

produções escoadas para o terminal de Angra dos Reis. As informações em relação a este cenário encontram-se na Tabela 6.

TABELA 6 – Parâmetros específicos de cada plataforma (Cenário 4)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Demanda (m ³)	49.000	36.000	47.000	79.000	36.000	71.000	67.000	81.000	45.000	43.000	54.000	45.000
Tempo de atend. (h)	19	15	18	28	15	25	24	28	18	17	20	18
Tempo mais cedo (h)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tempo sem multa (h)	120	40	83	64	104	53	41	60	102	142	128	123
Tempo limite (h)	229	70	157	118	197	95	73	111	194	274	246	235

4.2. Análise dos Resultados

O modelo de programação matemática desenvolvido foi implementado no software de otimização LINGO 10.0. Os testes foram executados utilizando a seguinte

configuração de hardware: processador Pentium® Dual-core T4400 2.20 GHz, memória RAM de 4.0 GB e sistema operacional Windows 7 de 32 bits. A Tabela 7 apresenta os resultados encontrados.

TABELA 7 – Resultados Computacionais.

Cenário	Número de Plataformas	Navios Utilizados	Tempo de Processamento (min:seg)	Número de Iterações	Valor da Função Objetivo	Volume Total Escocado (m ³)
1	7	4	00:44	1360	1.341.407	385.000
2	9	5	04:28	2620	1.786.991	511.000
3	10	5	12:23	3157	1.873.674	554.000
4	12	--	120:00	--	--	--

Na Tabela 7 pode-se observar que para os três primeiros cenários apresentados, o sistema conseguiu gerar resultados com as soluções ótimas. No entanto, os testes mostraram que, para instâncias maiores, cenário 4, as soluções ótimas são praticamente

impossíveis de serem obtidas em um tempo computacional hábil.

A Tabela 8 apresenta a composição da frota, ou seja, a quantidade de cada tipo de navio necessária para cada cenário.

TABELA 8 – Descrição da Frota para cada Cenário.

Cenário	Navios Utilizados	Panamax	Aframax	Suezmax
1	4	1	2	1
2	5	2	1	2
3	5	1	2	2

É importante ressaltar, que o problema abordado neste estudo é um problema de otimização combinatória de alta complexidade computacional, sendo do tipo *NP-Hard*.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo inicial de otimização para auxiliar o decisor na elaboração dos roteiros de navios aliviadores para escoamento da produção de plataformas FPSO/FSO. Assim, foi realizada uma análise e levantamento do domínio do

problema, sendo identificada uma série de restrições inerentes a este.

Como proposta inicial foi construído um modelo de programação inteira-mista que atenda a toda a demanda das plataformas, empregando para isto o menor número possível de navios e minimizando as distâncias percorridas até o final do roteiro de cada um deles.

O modelo foi executado sobre quatro cenários baseados em dados reais e os resultados obtidos foram viáveis para o problema em questão, validando assim o modelo proposto.

REFERÊNCIAS

1. BODIN, L. e GOLDEN, B. *Classification in vehicle routing and scheduling*. Networks, v. 11, n. 2, 1981.
2. DE OLIVEIRA, H. e VASCONCELOS, G., *A hybrid search method for the vehicle routing problem with time windows*. Annals of Operations Research, 2008.
3. GROVE, M. A., *Sistema de Posicionamento Híbrido para FPSOs*. Tese de Mestrado em Engenharia Oceânica. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação de Engenharia, UFRJ, 2005.
4. HENTZY, F. C., *Um Modelo Matemático para a Programação e Roteamento de Embarcações de Apoio à Exploração de Petróleo Offshore*. Monografia do curso de Engenharia de Produção da UFF, 2012.
5. MURACT, A., SOLETTI, J. e CARVALHO, S., *Scheduling of crude oil flow from offshore platforms*. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Buenos Aires, Argentina, 2010.
6. ONO, R. T., *Modelagem Sistêmica e Planejamento Logístico da Cadeia de Suprimentos de Petróleo*. Tese (Doutorado) apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP- SP, 2007.
7. PETROBRAS. Disponível em <www.petrobras.com.br> consultado em 16/10/2013 às 19:32.
8. PUCU, A. B., *Logística do Escoamento da Produção de Petróleo de Plataformas Offshore Via Transporte Naval*. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Alagoas (UFA), 2011.
9. RIBEIRO, L. S. e IACHAN R., *Dimensionamento da Frota de Supridores para Plataformas de Petróleo*. XLI SBPO – Porto Seguro - BA - Brasil, 2009.
10. RIISE, A. e STØLEVIK, M., *Implementation of guided local search for the vehicle routing problem*. Relatório Técnico, Department of Computer Science, Michigan State University, Norway, 1999.
11. SILVA, A. C., SANTOS, I. C., CONCEIÇÃO, W. L., SILVA, D. J., NASCIMENTO, S., SILVA, V. T. *Operação offloading: análise preliminar de perigo e os impactos ambientais*. Revista Eletrônica Novo Enfoque, v. 13, n. 13, p. 207, 2011.
12. SOLOMON, M. M., *Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints*. Operational Research, 35:254–265, 1987.

Sources of funding: No
Conflict of interest: No
Date of first submission: 2015-02-04
Last received: 2015-02-04
Accepted: 2015-02-06
Publishing: 2015-04-30