

Programação de Cargas em Barcos de Suprimento de Unidades Marítimas

Rennan Danilo Seimetz Chagas [†], Victor Anselmo Silva [‡], Gustavo Cunha de Bittencourt [†],
Rafael Pedro Longhi [†], Igor Girão Peres Vianna [†], Paulo Cesar Ribas [‡], Virgílio José Martins
Ferreira Filho [†]

[†] Programa de Engenharia de Produção/COPPE/UFRJ

[‡] Petróleo Brasileiro S.A – CENPES

Centro de Tecnologia, Bloco F, Cidade Universitária, Rio de Janeiro-RJ

CENPES, Cidade Universitária, Rio de Janeiro-RJ

chagasrennan@gmail.com, victor.anselmo@petrobras.com.br,
gustavo@gustavo.im, rafaelplonghi@poli.ufrj.br,
igor_gpv@poli.ufrj.br, paulo.ribas@petrobras.com.br,
virgilio@ufrj.br

RESUMO

As atividades de exploração e produção de óleo e gás (E&P) *offshore*, têm imposto grandes desafios à área de planejamento e operação de recursos e infraestrutura logísticos. O dimensionamento e a utilização adequados das embarcações supridoras são fundamentais para manutenção de uma operação eficiente e com custo aceitável, dado que a quantidade de cargas movimentada é vultosa. Neste trabalho é apresentado um modelo matemático de otimização inteira mista que realiza a programação de cargas em barcos de suprimento, visando maximização do nível de serviço, traduzido pelo percentual de entrega de cargas às unidades marítimas dentro do prazo. Este modelo é inserido em um simulador que replica realisticamente as condições operacionais. A despeito do acoplamento de um modelo de otimização a um modelo de simulação gerar um tempo significativo de execução, o ganho em qualidade da solução é significativo, gerando uma melhoria média de 2,5% no nível de serviço no cenário testado.

PALAVRAS CHAVE. Logística *offshore*, simulação, programação inteira mista.

ABSTRACT

Offshore oil and gas exploration and production (E&P) activities have imposed major challenges to planning and operation of resources and logistics infrastructure. Proper dimensioning and use of supply vessels are essential tasks to hold an efficient and cost-effective operation, since the amount of cargo handled is substantial. In this work a mathematical model of mixed integer optimization is presented, which performs cargo scheduling from a fleet of supply vessels, in order to maximize the service level, defined as the percentage of cargo delivered on time to maritime units. This model runs as an called-on-demand external subroutine of a simulator that realistically represents the operating conditions. In spite of the fact the coupling an optimization model in a simulation process generates significant increase in execution time, the quality of the solution has significantly improved, generating an average gain of 2.5% in the service level for the studied scenario.

KEYWORDS. Offshore logistics, simulation, mixed integer programming.

1. Introdução

As atividades de exploração e produção de óleo e gás (E&P) no setor *offshore*, especificamente na camada pré-sal, têm imposto grandes desafios relacionados não apenas a tecnologias voltadas para engenharia de petróleo, mas também ligados à área de planejamento e operação de recursos e infraestrutura logísticos, fundamentais para a continuidade operacional em E&P.

Em 2016, a produção nacional de petróleo apresentou crescimento pelo terceiro ano consecutivo, de 3,2% na comparação anual, atingindo 918,7 milhões de barris. Sendo a produção marítima responsável por 94% do total com o pré-sal representando 40,6% da produção nacional. O Estado do Rio de Janeiro se manteve como o maior detentor de reservas provadas, contabilizando 82,3% do total localizando-se todas no mar [ANP, 2017].

Portanto, a logística de apoio *offshore*, também chamada de logística de E&P ou apenas logística *offshore* — cujo papel é transportar cargas e pessoas entre instalações em terra, tais como bases de apoio e aeroportos, e unidades marítimas (UMs), a exemplo, sondas, plataformas e embarcações especiais — surge como uma área com margem relevante para o desenvolvimento de soluções baseadas, por exemplo, em modelos para planejamento e operação de recursos e infraestrutura de forma mais eficiente. Na figura 1 vemos uma representação gráfica da rede logística descrita nesse trabalho.

Especificamente sobre as embarcações supridoras, o dimensionamento e a utilização adequados destas são fundamentais para manutenção de uma operação eficiente e com custo aceitável, dado que a quantidade de cargas movimentada é vultosa, tanto no sentido de entrega às unidades, como na remoção destas para tratamento em terra e reuso *offshore*. Comumente, o transporte marítimo é realizado por embarcações ou barcos chamados *Platform Supply Vessels* (PSVs). Já a troca de tripulações e o transporte de pessoal especializado são feitos geralmente via helicópteros.

O caso tratado nesse artigo refere-se ao contexto logístico da empresa Petróleo Brasileiro S. A. (PETROBRAS), a qual realiza suas operações de transporte de cargas a partir de quatro frotas de PSVs: (i) uma para transporte de cargas de convés e água, denominada de agora em diante de frota de carga geral (CG); (ii) outra para atendimento à demanda de diesel, denominada Oleiros; (iii) uma frota para transporte de fluidos e grânéis sólidos necessários durante as atividades de construção de poços; e (iv) os Cimenteiros, empregados para entrega de cimento também utilizado em etapas específicas da construção de poços. Há ainda outras frotas com outros fins, tais como embarcações de prontidão contra eventos emergenciais, embarcações para manuseio de espas e barcos para reboque e manuseio de âncoras, chamados *Anchor Handling and Towing Supply* (AHTS).

Além do planejamento das entregas de carga, existe a necessidade de coordenar outras atividades que fazem parte da rotina das unidades, tais como o alívio de plataformas — remoção do petróleo produzido, que está armazenado em tanques — pouso de aeronaves que transportam

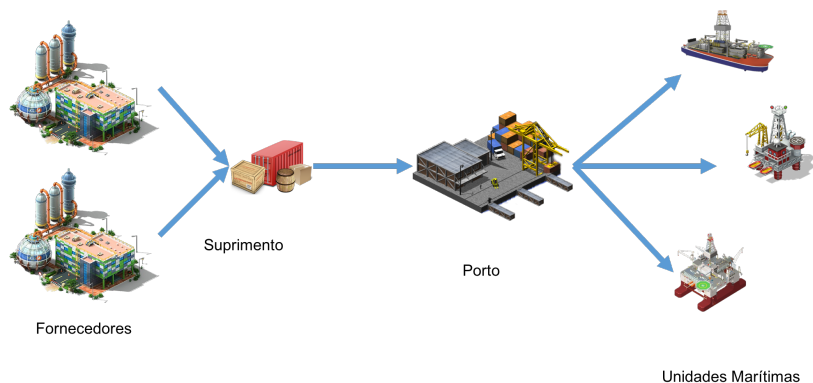


Figura 1: Rede logística *offshore*

pessoal e mergulhos de inspeção/manutenção. Esse cenário cria uma cadeia logística complexa, na qual o planejamento operacional das embarcações supridoras torna-se uma tarefa crítica para a manutenção de um nível de serviço adequado no transporte de cargas entre bases de apoio e UMs, bem como para redução de custos.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe um modelo matemático de programação inteira mista que determina o planejamento de entregas de suprimento. A função objetivo visa a maximização do nível de serviço, traduzido pelo percentual de entrega de cargas às UMs dentro do prazo. A fim de medir o desempenho da programação definida pelo otimizador, comparam-se resultados gerados por este modelo com o processo manual de planejamento. O processo manual utilizado atualmente consiste numa política de entregas FIFO (*First in - First Out*), isto é, os pedidos são agendados para entrega conforme vão surgindo por parte das unidades, tentando conciliar o volume entregue com a capacidade dos barcos disponíveis. Os resultados da otimização foram testados em um simulador de eventos discretos que replica as condições operacionais no contexto da empresa.

Quanto a organização do artigo, tem-se: na seção a seguir há uma revisão bibliográfica sobre problemas correlatos em logística *offshore*; após isso consta a definição e formulação do problema; o método desenvolvido para integrar o otimizador no simulador; a experimentação; conclusões; trabalhos futuros e referências bibliográficas.

2. Revisão Bibliográfica

Em 2008, Aas et al. [2007] realizaram uma análise sobre o roteamento de barcos de apoio, e concluíram que em outras partes do mundo, assim como no caso brasileiro, também não é dada a devida importância ao tema, os operários possuem poucos conhecimentos em logística e em geral as decisões são tomadas com base na experimentação. Em 2010, Aas e Wallace [2010] apresentaram um outro caso semelhante, só que da Statoil em Kristiansund. Em 2009, Aas et al. [2009], apresentaram um artigo focado em capacidades e configuração da frota, o que não chega a ser interessante na análise proposta por este trabalho, já que se admite que a frota foi previamente contratada e não mudará.

Outros autores também realizaram estudos sobre problemas semelhantes em diversas partes do mundo. Romero et al. [2007] realizaram também a montagem de modelos quantitativos para a movimentação de barcos e helicópteros para o caso do abastecimento às unidades *offshore*.

Kaiser e Snyder [2010] realizou uma análise sobre a condição até então do Golfo do México e propôs um modelo para quantificar e prever níveis de serviço nas unidades. Este era baseado em um sistema determinístico com tempo invariante e linear, diferentemente dos outros autores, este teve como foco em seu artigo exatamente o objetivo central proposto neste trabalho, ou seja, otimizar o atendimento às janelas de tempo e elevar o nível de serviço. Ainda em 2010 Kaiser [2010] também publicaram um estudo sobre o número de viagens necessárias para as unidades *offshore* do Golfo do México, propondo sua otimização.

O problema encontrado na Bacia de Campos pode ser analisado também como um problema de roteamento de veículos periódico. Muitos artigos analisam problemas deste tipo. Por exemplo, Fagerholt [2000] propõem um modelo de roteamento periódico utilizando programação inteira, mas sua análise tem como foco o custo financeiro devido a unidades fechadas durante a noite.

Halvorsen-Weare et al. [2012] trabalham uma solução determinística para a programação de supridores. Embora essa solução tenha sido implementada em situações reais e com obtenção de ganhos, Halvorsen-Weare e Fagerholt [2011] apontam a dificuldade da execução da programação planejada por conta de imprevisibilidades, muitas das quais derivadas de atrasos por conta de condições climáticas. Halvorsen-Weare e Fagerholt [2011] propõem um modelo de programação robusta – capaz de considerar as imprevisibilidades – unindo o modelo com simulação e outras aproximações. O modelo proposto procura determinar a frota ótima, a programação e as rotas, considerando este um problema periódico. São consideradas janelas de tempo, frota heterogênea,

assim como o problema analisado neste trabalho. Entretanto, diferentemente do caso brasileiro, existe um tempo pré-determinado de abertura do porto. Além disso, a instabilidade climática presente no ambiente analisado pelo artigo faz com que soluções determinísticas não sejam aceitáveis. A função objetivo tinha como objetivo minimizar o custo.

Shyshou et al. [2010] também trabalhou com problemas de roteamento periódico e montou uma heurística para resolver problemas do tipo, além de realizar uma análise sobre a composição ótima da frota. Muitos autores inclusive estudaram a problemática da Bacia de Campos. Christensen et al. [2004] discutem alguns aspectos do problema de programação que são encontrados na Bacia de Campos, apontando problemas, como por exemplo a resistência na adoção de sistemas baseados na otimização. [Batista, 2005] focou sua análise no Porto de Imbetiba, propondo um modelo para simular as operações neste porto.

Leite [2012] também fez uma grande análise sobre toda a cadeia de transporte de cargas para unidades na Bacia de Campos. Em seu texto, é detalhada toda a sequência de operações praticada na Bacia de Campos, definindo-se quais os principais problemas enfrentados e quais as principais melhorias demandadas. Além disso, é realizada uma revisão completa da literatura sobre o tema, compilando-se resumos de vários artigos que debatem temas relacionados. Também podem ser encontrados muitos dados referentes às operações na Bacia de Campos, além de uma extensa análise sobre estes.

Além de uma extensa parte descritiva das atividades, Leite [2012] também propõe uma nova modelagem para o problema estudado. A heurística adotada é composta por quatro fases: na primeira fase é realizada uma clusterização segundo o método de Clarke & Wright. Em seguida, é criada uma grade de tempo das atividades. Em uma terceira fase, a demanda histórica é alocada nas viagens de acordo com a grade de tempo, ainda sem considerar a limitação devido à capacidade do barco. Por fim, é realizada uma simulação para determinar o tempo necessário para se chegar a cada unidade, o tamanho necessário para a frota e sua composição. O objetivo central deste método é otimizar as viagens, diminuindo-se o número total de viagens e o tempo perdido em cada uma. Deseja-se também garantir o nível de serviço, respeitando-se janelas de tempo.

Uglane e Friedberg [2012] trabalham o problema de roteamento e sequenciamento de suprimentos (PSV). Seu modelo, por ser focado também no problema de roteamento, peca por tentar ser muito geral, o que torna impraticável resolver instâncias de tamanho real. Além disso, trabalhar o roteamento junto com a programação do porto implica em uma necessidade de grande flexibilidade operacional, pois sempre que ocorrer alguma movimentação de sondas ou mudança do perfil de demanda, que é frequente, as unidades terminam por perder a previsibilidade das entregas.

3. O problema de programação de carga geral

A logística de suprimento de CG na empresa do caso de estudo baseia-se em planos pré-definidos de visitas às UM. Nestes planos, as rotas realizadas pelos PSVs são previamente definidas por especialistas da empresa e, portanto, as mesmas formam um grupo de UMs que demandam carga geral, comumente dividida em pedidos de entrega às UMs e pedidos de devolução delas, as cargas de retorno.

Essa demanda acaba por impor operações dos PSVs em uma base de apoio para carregar os pedidos de entrega e descarregar os pedidos de devolução. Tais operações das embarcações em bases de apoio acontecem nos chamados "berços", que são os locais em que a embarcação atraca, e a partir dos quais guindastes movimentam a demanda de cargas entre o convés do barco e o porto. No caso da empresa em questão, dá-se o nome de "cronogramas" a estas atracações de PSVs nos berços para movimentação de cargas, gerando um esquema contínuo de visitas às UMs de um grupo. É possível que eventos particulares requeiram a revisão destes planos logísticos de transporte de cargas de convés. Por exemplo, caso sondas de perfuração troquem de locação, é provável que o grupo em que elas se encontram precise ser redesenhado, levando a necessidade de projetar novas rotas e, por fim, projetar novos cronogramas para operação dos PSVs nos berços.

O problema fundamental estudado nesse artigo – o qual denominamos Problema de Programação de Carga Geral (PPCG) – reside na programação das cargas de convés da frota de CG, com foco específico nos pedidos de entrega. Por programação entende-se alocar esses pedidos a um cronograma, o qual utiliza um PSV para transporte. Atualmente, a programação na empresa é um processo manual, feito por especialistas os quais observam aspectos tais como: (i) a demanda e prazos dos pedidos de CG; (ii) os cronogramas previstos para o(s) grupo(s) de UMs; (iii) os PSVs disponíveis; e então realizam a alocação de cargas aos barcos que, por sua vez, cumprirão o cronograma selecionado. Sendo uma tarefa manual e, portanto, difícil de conjugar da melhor forma possível os três aspectos mencionados anteriormente, o modelo de otimização desenvolvido neste trabalho visa portanto melhorar o nível de serviço logístico.

O problema de programação de carga geral (PPCG) pode ser definido como: dados um conjunto de clientes que geram pedidos de CG para entrega em certo horizonte de planejamento por um conjunto de viagens e um conjunto de veículos, deseja-se encontrar qual veículo será usado para cada viagem; quais pedidos serão entregues em cada viagem; a quantidade de produtos carregados em cada veículo em cada viagem; e os tempos que os veículos levarão para operar em cada locação (UM ou porto). Como objetivo, visa-se maximizar o nível de serviço, medido pelo percentual de pedidos que são entregues no prazo e que são recusados. Como principais restrições, têm-se a capacidade de cada barco e os prazos de entrega das cargas.

3.1. Modelo matemático

Esta seção apresenta a formulação do modelo de programação inteira mista proposto para resolver o PPCG.

Notação

Conjuntos:

$V, \{v\}$	Conjunto de veículos
$R, \{r\}$	Conjunto de pedidos
$P, \{p\}$	Conjunto de produtos
$T, \{t\}$	Conjunto de viagens
$C, \{c\}$	Conjunto de clientes

Parâmetros:

Q_r^p	unidades do produto p demandada no pedido r
C_v^p	Capacidade do veículo v para produto p
ETA_v	Horário de chegada do veículo v
B_t	Abertura da janela de carregamento da viagem t
UB_t	Fim da janela de carregamento da viagem t
$S_{c,c+1}$	Tempo de viagem entre clientes consecutivos c and $c + 1$
DD_r	Data de entrega do pedido r
HC_c^p	Tempo de carregamento no cliente c por unidade de produto p
HP^p	Tempo de carregamento no porto por unidade do produto p

Variáveis de Decisão:

$z_r^t \in \{0, 1\}$	1 se o pedido r é entregue na viagem t
$y_v^t \in \{0, 1\}$	1 se o veículo v é designado para viagem t
$l_r \in \{0, 1\}$	1 se o pedido r é entregue no prazo
$h_r \in \{0, 1\}$	1 se o pedido r tem entrega recusada
$x_{p,v}^t \in \mathbb{R}_+$	quantidade de produto p carregada no veículo v para viagem t
$f_{p,v}^t \in \mathbb{R}_+$	folga de capacidade para produto p no veículo v para viagem t
$tl_c^t \in \mathbb{R}_+$	tempo em que o barco chega no cliente c na viagem t
$t_r \in \mathbb{R}_+$	tempo no qual o pedido r é entregue
$w_c^t \in \mathbb{R}_+$	tempo de carregamento no cliente c na viagem t
$wp^t \in \mathbb{R}_+$	tempo de carregamento no porto para viagem t

$$\min \sum_r (h_r - \frac{l_r}{|R|}) + \sum_{p,v,t} (\frac{\max(B_t) - B_t}{B_t \cdot |P| \cdot |V|} \cdot f_{p,v}^t) + 1 \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_v x_{p,v}^t \geq \sum_r Q_r^p \cdot z_t^r \quad \forall p \in P, t \in T, v \in V \quad (2)$$

$$\sum_t z_t^r \leq 1 \quad \forall r \in R \quad (3)$$

$$\sum_v y_v^t \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_t y_v^t \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (5)$$

$$x_{p,v}^t + f_{p,v}^t \leq C_v^p \cdot y_v^t \quad \forall p \in P, t \in T, v \in V \quad (6)$$

$$ETA_v \cdot y_v^t \leq B_t \quad \forall v \in V, t \in T \quad (7)$$

$$h_r + \sum_t z_t^r = 1 \quad \forall r \in R \quad (8)$$

$$h_r + l_r \leq 1 \quad \forall r \quad (9)$$

$$M \cdot l_r + t_r \geq DD_r \quad \forall r \in R \quad (10)$$

$$M \cdot (l_r - 1) + t_r \leq DD_r \quad \forall r \quad (11)$$

$$t_r \geq tl_c^t - M \cdot (1 - z_t^r) \quad \forall t \in T, c \in C, r \in R \quad (12)$$

$$t_r \leq tl_c^t + M \cdot (1 - z_t^r) \quad \forall t \in T, c \in C, r \in R \quad (13)$$

$$tl_{c+1}^t \geq tl_c^t + w_c^t + S_{c,c+1} \quad \forall t \in T, c \in C \quad (14)$$

$$tl_1^t \geq B_t + wp^t + S_{0,1} \quad \forall t \quad (15)$$

$$w_c^t \geq \sum_r (HC_c^p \cdot Q_r^p \cdot z_r^t) \quad \forall c, t | c \in k \quad (16)$$

$$wp^t \geq HP^p \cdot x_{p,v}^t \quad \forall p \in P, t \in T, v \in V \quad (17)$$

$$wp^t \leq UB_t \quad \forall t \in T \quad (18)$$

$$z_t^r \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T, r \in R \quad (19)$$

$$y_v^t \in \{0, 1\} \quad \forall v \in V, t \in T \quad (20)$$

$$l_r \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R \quad (21)$$

$$h_r \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R \quad (22)$$

$$x_{p,v}^t \in \mathbb{R}_+ \quad \forall p \in P, v \in V, t \in T \quad (23)$$

$$f_{p,v}^t \in \mathbb{R}_+ \quad \forall p \in P, v \in V, t \in T \quad (24)$$

$$tl_c^t \in \mathbb{R}_+ \quad \forall c \in C, t \in T \quad (25)$$

$$t_r \in \mathbb{R}_+ \quad \forall r \in R \quad (26)$$

$$w_c^t \in \mathbb{R}_+ \quad \forall c \in C, t \in T \quad (27)$$

$$wp^t \in \mathbb{R}_+ \quad \forall t \in T \quad (28)$$

A função objetivo (1) Se divide em duas parcelas. O primeiro somatório procura maximizar o nível de serviço, i.e., a função cresce com o número de pedidos que são entregues no prazo e é penalizada com os pedidos que são recusados. A segunda parcela procura priorizar o uso do espaço disponível ao longo do tempo. Como entre a liberação dos pedidos para programação e o efetivo

início do carregamento do barco no porto serão gerados novos pedidos pelas unidades, a segunda parcela faz com que se priorize ocupar barcos que farão viagens mais próximas no horizonte de planejamento, deixando assim espaço disponível para viagens futuras quando haverá mais pedidos para serem programados.

A restrição (2) garante que o total de produtos transportados por um veículo seja pelo menos o total de produto demandado pelos pedidos que forem aceitos para entrega naquela viagem. A restrição (3) assegura que um pedido r seja alocado em no máximo uma viagem. Em seguida, as inequações (4 – 5) garantem que não mais do que um veículo seja alocado para a mesma viagem e que o mesmo seja alocado para não mais do que uma viagem.

Adiante, a restrição (6) impede que os veículos sejam carregados com mais produtos do que sua capacidade, sendo esta o resultado da soma da quantidade de produto carregado ($x_{p,v}^t$) e da folga disponível ($f_{p,v}^t$). A restrição (7) garante a compatibilidade entre a abertura de janela no porto com os horários de chegada dos veículos.

A equação (8) controla se um pedido r foi rejeitado. Se o pedido não tiver sido alocado em nenhuma viagem, (todas as variáveis z_r^t são 0) então o pedido foi recusado (h_r tem que ser 1). Se o pedido foi recusado, ele também é considerado fora do prazo (9). As restrições (10 – 11) calculam se o pedido entregue chegou no prazo. Para verificar as restrições anteriores, seguem as equações (12 - 13) que impõe que o horário de entrega do pedido é o mesmo em que o veículo chega ao cliente.

Algumas das restrições anteriores precisam do horário de chegada do veículo ao cliente que é calculado nas inequações (14 – 15). O tempo que o veículo chega num cliente c é igual ao tempo que ele saiu do cliente anterior, somado do tempo de carregamento e tempo de viagem do cliente anterior para o atual. O caso particular é para o primeiro cliente da rota que é atendido depois de gasto o tempo de carregamento no porto, somado do tempo de viagem do porto para o primeiro cliente.

Por fim temos as restrições dos tempos de carregamento. (16) garante que o tempo de carregamento no cliente é pelo menos a soma dos tempos necessários para descarregar todos os produtos em sequencia. Já no porto, consideramos que o tempo de carregamento será de pelo menos o tempo gasto para carregar o produto que consome maior tempo de transferência do porto para o veículo (17) - carregamentos feitos em paralelo. Além disso, o tempo máximo que se pode gastar no porto é dado pelo limite da janela de tempo (18). As restrições (19 – 28) garantem integralidade das variáveis binárias z, y, l, h e positividade das variáveis contínuas x, f, tl, t, w, wp .

4. O ambiente de teste e validação

O modelo de programação matemática foi implementado usando a linguagem Python com o uso de rotinas de otimização do solver Gurobi. Para testes e validação foi usado um simulador estocástico de eventos discretos desenvolvido pela PETROBRAS, chamado SimLog, projetado para representar com fidelidade as operações de berços e o sistema de transporte marítimo de cargas atualmente em vigência na Petrobras. O SimLog modela a estrutura logística da bacia de Campos e do Espírito Santo, considerando a infraestrutura presente composta pelo porto de Açú, porto do Rio, as boias de atracação de navios-tanque localizadas em locais estratégicos das bacias estudadas e as unidades marítimas presentes na bacia. Ele possui uma alta granularidade de configurações, permitindo a possibilidade de simular diversas combinações de regras operacionais.

Seu funcionamento geral consiste em atribuir um cronograma de entregas para PSVs de carga geral que se encontram disponíveis no fundeio. Concomitantemente a essas entregas programadas, as unidades marítimas disparam pedidos de diesel na medida em que seus tanques atingem o ponto de ressuprimento. O modelo contempla operações de entrega de carga de convés, água e óleo diesel e permite simular uma frota multipropósito ou uma frota especializada por produto.

O SimLog foi implementado em Promodel, que conta com linguagem e ambiente gráfico proprietários e fechados, uma escolha de design que a priori dificulta a conexão com scripts externos necessários à execução dos algoritmos de otimização. Entretanto, o software possui uma função

(XSUB) que lhe provê a capacidade de acionar rotinas externas que estejam em uma biblioteca dinâmica do Windows (DLL) devidamente configurada, o que possibilitou a criação de uma ponte entre o simulador e o solver, bem como a realização de testes utilizando um método heurístico.

A solução foi desenhada com uma arquitetura cliente/servidor que se comunica através de sockets. Um dos métodos da DLL, escrita em C++ seguindo as especificações definidas pelo Promodel, é ativado a partir da chamada da função XSUB e age como o cliente da operação. Ele envia um sinal para que o servidor implementado em Python inicie a construção do modelo de otimização a partir dos dados exportados do simulador em formato CSV e ativa o solver para a solução dentro de um intervalo de tempo pré-determinado. Ao fim do processo, os resultados da otimização são salvos em um arquivo de saída (também no formato CSV, a ser lido pelo Promodel) e uma mensagem com o status da otimização é repassada ao cliente, que por sua vez a retorna ao Promodel. Caso uma solução viável tenha sido encontrada a simulação tem continuidade.

5. Experimentação

5.1. Cenário

Como apontado na seção anterior o modelo desenvolvido foi testado e validado em um ambiente de simulação. Os cenários estudados foram criados considerando uma frota heterogênea de 35 PSVs CG, que atendem um total de 90 UMs, divididas em 23 agrupamentos *clusters*. O simulador da logística da E&P reproduz os processos logísticos relativos aos berços e ao transporte marítimo da empresa, levando em consideração diversas variáveis aleatórias, tais como: (i) tempo de movimentação de cargas no berço; (ii) tempo de navegação entre locações; (iii) esperas/atrasos, devidos a fatores incertos exógenos (ex.: condições ambientais desfavoráveis), impostos aos PSVs imediatamente antes do início do serviço na UM; (iv) tempo de movimentação de cargas entre PSV e UM; e (v) indisponibilidade de PSVs devido à ocorrência de manutenções corretivas. Além destes aspectos de incerteza relativos ao recurso barco, o simulador também reproduz a demanda por CG e por diesel de cada UM, junto com seus respectivos prazos de entrega, configurando-se em um sistema estocástico com distribuições estatísticas obtidas a partir de dados reais da operação.

São usadas duas políticas para seleção de qual PSV CG irá atender os pedidos de carga geral de cada *cluster*. Na primeira política é utilizada a regra FIFO (*First in First Out*), na qual o próximo cronograma será realizado pelo PSV que está há mais tempo no fundeio esperando, carregando o máximo de carga que a sua capacidade permitir. Na segunda, denominada política SimOpt, é utilizado o modelo descrito na seção 3, que realiza uma seleção otimizada de qual PSV irá atender qual cronograma e quais pedidos serão entregues por ele, visando uma melhor utilização dos recursos disponíveis. De maneira a emular a situação real em que o modelo de programação de cargas é utilizado, o Simlog incorpora as operações de entrega de água e óleo diesel, não incluídas no modelo de otimização. Com a finalidade de ilustrar o cenário completo em que os experimentos foram realizadas, tais operações são descritas a seguir.

O diesel é transportado por uma frota de 11 PSVs Oleeiros que são responsáveis por todo o abastecimento demandado pelas UMs. A entrega dos pedidos de diesel é realizada na ordem em que eles foram realizados. Tanto os PSVs CG quanto os PSVs Oleeiros são abastecidos nos Navios tanques, tanto para consumo próprio quanto para o abastecimento das UMs. O carregamento de diesel nos PSVs CG é realizado após o término de todas entregas de cada viagem, antes de se direcionar à área de fundeio, sendo realizado somente se o nível de diesel estiver abaixo do ponto de ressuprimento definido. O carregamento de diesel dos PSVs Oleeiros é realizado a qualquer momento, após um atendimento, desde que o ponto de ressuprimento seja alcançado. Há visitas adicionais desses PSVs ao porto para troca de tripulação. Os Navios Tanque se dirigem para boias dispostas na bacia que estejam vazias, realizando o abastecimento dos PSVs e de outras embarcações, uma de cada vez, até que todo o diesel seja consumido e ele siga para um porto de abastecimento de diesel.

Nos cenários simulados é considerado que o carregamento de água é feito em paralelo ao de carga geral, não afetando o tempo de carregamento no porto e nos tempos de descarregamento nas UMs

5.2. Resultados

Os testes foram realizados em um Intel (®) Xeon (®) CPU E5-2620 0 @ 2.00 GHz (2 processadores) com 200 GB de memória RAM, utilizou-se o *software* ProModel 2014 para a simulação, o otimizador foi rodado no Python 3.5.3 com auxílio do Gurobi 7.0.2.

As duas políticas de entrega foram simuladas por um período de 180 dias com um adicional de 90 dias de aquecimento com 30 replicações. Para a política FIFO foi levado um tempo total de 780 segundos para rodar todo o modelo, com a utilização do SimOpt foi levado um tempo total de 36 horas. Na política SimOpt, as chamadas da otimização se deram a cada 24 horas, com tempo de processamento limitado em 20 segundos, sendo programadas até duas viagens por *cluster* e uma folga de 10 horas no ETA fornecido, para evitar um acúmulo de cronogramas atrasados devido a variação desta estimativa. Os resultados consolidados no gráfico da figura 2 e provenientes da tabela 2 apontam para uma vantagem ao se usar a política SimOpt para programar as entregas, com uma vantagem média de 2,5% mais pedidos entregues no prazo.

Tabela 2: Resultados de atendimento de pedidos por replicação

Replicação	Política FIFO		Política SIMOPT		Replicação	Política FIFO		Política SIMOPT	
	No Prazo	Atrasados	No Prazo	Atrasados		No Prazo	Atrasados	No Prazo	Atrasados
1	52519	17170	54772	15687	16	48909	21171	54709	15745
2	50827	18573	52433	17577	17	51949	18279	51098	18810
3	51595	18196	51656	19157	18	52755	17143	53214	17005
4	51459	18596	53411	16979	19	50643	19059	52848	17533
5	52017	18239	48763	21019	20	51640	18255	54933	14936
6	51047	18500	52280	17609	21	51421	18363	54001	16550
7	50776	18817	54807	15355	22	51927	17941	52204	17807
8	50945	19426	53626	17020	23	51339	18881	55365	16044
9	51226	18845	53573	15825	24	52390	17627	51200	19098
10	50331	18957	55299	15432	25	51252	18668	52649	17173
11	50600	19167	55711	15214	26	49344	21094	51422	18775
12	50779	19123	53318	17262	27	52985	16981	52856	16639
13	51008	18917	53158	17272	28	51633	18103	54834	15286
14	50827	19102	52631	17197	29	51188	18707	50852	19374
15	51358	18408	55026	15090	30	51059	18832	55345	15280

Por se tratarem de duas amostras independentes, com dados não emparelhados e variâncias diferentes, utilizamos o teste *t* de Welch [Welch, 1938] para verificar que a diferença era de fato significativa e podemos afirmar para um nível de significância de 5% que o valor esperado de entregas no prazo da política SimOpt é maior do que o da política FIFO.

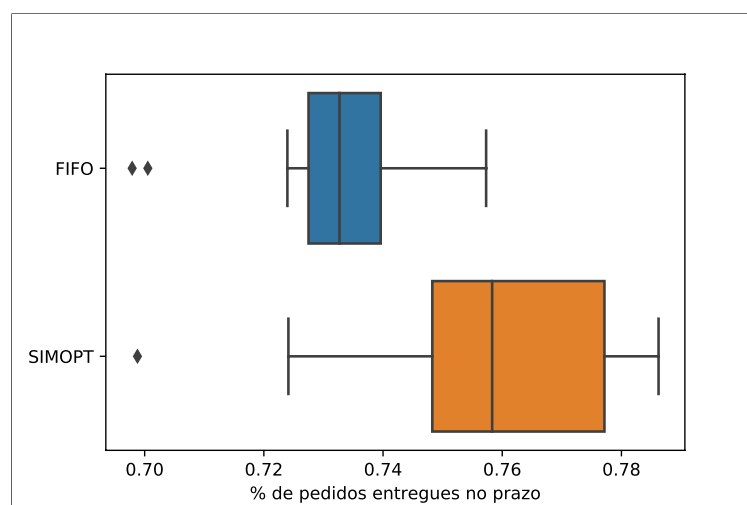


Figura 2: Rede logística *offshore*

6. Conclusões

Neste trabalho apresentamos o desenvolvimento de um modelo de otimização para a programação de cargas em barcos de suprimento de unidades marítimas. Este modelo foi projetado para atuar como ferramenta de suporte à decisões complexas de programação de cargas durante a execução de um simulador estocástico – decisões estas inviáveis de serem pré-estabelecidas dentro do simulador – o qual foi construído para emular operações de logística de óleo e gás *offshore*.

A despeito do acoplamento entre um modelo de otimização e um simulador aumentar significativamente o tempo de execução da simulação – antes da ordem de minutos e agora com valores em torno de um dia – o ganho em qualidade da solução foi significativo, proporcionando aumento do nível de serviço em 2,5% em média.

Mesmo com o escopo do presente trabalho estando limitado ao planejamento de carga geral, os resultados alcançados são promissores e, portanto, motivam a extensão do modelo de otimização para programação de cargas em contextos de maior complexidade, os quais surgem, por exemplo, quando se considera outros insumos tais como diesel e água também demandados por unidades marítimas. Em cenários mais complicados como esse, o ganho de uma ferramenta de otimização pode se tornar ainda mais evidente.

7. Trabalhos futuros

Dentre as possibilidades de resultados que se pretende atingir com a expansão do modelo, podemos incluir: novos incrementos no nível de serviço dos demais produtos a serem tratados, redução da frota e um melhor gerenciamento de produtos críticos, tal como o diesel, evitando-se tanto a manutenção de níveis excessivos de estoque deste produto, como períodos longos em que o estoque esteja abaixo de patamares operacionalmente seguros.

Outra frente de trabalhos futuros vislumbrada é o desenvolvimento de modelos mais complexos para o planejamento das entregas. No caso apresentado, os barcos são utilizados uma única vez por ciclo de planejamento. Como os tempos de ciclo (saída do porto e retorno ao fundeio) giram em torno de 3 dias e meio, acreditamos que expandir os modelos para considerar o reaproveitamento dos barcos possa elevar os ganhos com relação à utilização da frota.

Por fim, a maior fonte de incertezas no problema estudado está na geração de pedidos. Como existe um descasamento temporal entre a chamada da sub-rotina de otimização e a atracação dos barcos nos berços, entendemos que novos pedidos podem ter sido gerados nesse ínterim. Incorporar essas incertezas em um modelo de otimização, transformando o problema determinístico em estocástico, é outra potencial frente de trabalho, a qual pode gerar soluções mais sofisticadas por abordar aspectos de caráter corretivo nas decisões de otimização.

Referências

- Aas, B., Gribkovskaia, I., Sr, Ø. H., e Shlopak, A. (2007). Routing of supply vessels to petroleum installations. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37 (2):164–179. ISSN 0960-0035. URL <http://www.emeraldinsight.com/10.1108/09600030710734866>.
- Aas, B. e Wallace, S. (2010). Management of logistics planning. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 3(3):1–17. ISSN 1935-5726.
- Aas, B., Øyvind Halskau Sr, e Wallace, S. W. (2009). The role of supply vessels in offshore logistics. *Maritime Economics & Logistics*, 11(3):302–325. URL <https://ideas.repec.org/a/pal/marecl/v11y2009i3p302-325.html>.
- ANP (2017). *Anuário Estatístico 2017*. Rio de Janeiro. URL <http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/anuario-estatistico/2017/anuario{ }2017.pdf>.

- Batista, B. C. D. (2005). *ANÁLISE DAS OPERAÇÕES COM EMBARCAÇÕES DE APOIO OFFSHORE NA BACIA DE CAMPOS - RJ*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.
- Christiansen, M., Fagerholt, K., e Ronen, D. (2004). Ship Routing and Scheduling: Status and Perspectives. *Transportation Science*, 38(1):1–18. ISSN 0041-1655. URL <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.1030.0036>.
- Fagerholt, K. (2000). Optimal policies for maintaining a supply service in the Norwegian Sea. *Omega*, 28(3):269–275. ISSN 03050483. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305048399000547>.
- Halvorsen-Weare, E. E. e Fagerholt, K. (2011). Robust Supply Vessel Planning. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, volume 6701 LNCS, p. 559–573. URL http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-21527-8_{_}62.
- Halvorsen-Weare, E. E., Fagerholt, K., Nonås, L. M., Asbjørnslett, B. E., Asbjørnslett, B. E., e Asbjørnslett, B. E. (2012). Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply vessels. *European Journal of Operational Research*, 223(2):508–517. ISSN 03772217. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2012.06.017><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221712004729>.
- Kaiser, M. J. (2010). An integrated systems framework for service vessel forecasting in the Gulf of Mexico. *Energy*, 35(7):2777–2795. ISSN 03605442. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544210000824>.
- Kaiser, M. J. e Snyder, B. (2010). An empirical analysis of offshore service vessel utilization in the US Gulf of Mexico. *International Journal of Energy Sector Management*, 4(2): 152–182. ISSN 1750-6220. URL <http://www.emeraldinsight.com/10.1108/17506221011058687>.
- Leite, R. P. (2012). *Maritime transport of deck cargo to Petrobras fields in Campos Basin: an empirical analysis, identification and quantification of improvement points*. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- Romero, M., Sheremetov, L., e Soriano, A. (2007). *A Genetic Algorithm for the Pickup and Delivery Problem: An Application to the Helicopter Offshore Transportation*, p. 435–444. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-3-540-72434-6. URL https://doi.org/10.1007/978-3-540-72434-6_43.
- Shyshou, A., Gribkovskaia, I., e Barceló, J. (2010). A simulation study of the fleet sizing problem arising in offshore anchor handling operations. *European Journal of Operational Research*, 203(1):230–240. ISSN 03772217. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221709005141>.
- Uglane, V. T. e Friedberg, D. Ø. (2012). *Routing and Scheduling of Platform Supply Vessels In the Brazilian Oil Industry*. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Welch, B. L. (1938). The significance of the difference between two means when the population variances are unequal. *Biometrika*, 29(3/4):350–362. ISSN 00063444. URL <http://www.jstor.org/stable/2332010>.