

PROPOSTA DE UM SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO PARA PROGRAMAÇÃO DE NAVIOS BASEADO EM OTIMIZAÇÃO: UM CASO PRÁTICO

Gustavo Souto dos Santos Diz

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio
Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea – Rio de Janeiro – RJ
gustavodiz@petrobras.com.br

Luiz Felipe Roris Rodriguez Scavarda do Carmo

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio
Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea – Rio de Janeiro – RJ
lf.scavarda@puc-rio.br

Roger Rocha

PETROBRAS
Av. Nossa Senhora da Penha, 1688 – Barro Vermelho – Vitória - ES
rogerocha@petrobras.com.br

RESUMO

O aumento da produção de petróleo brasileiro e o conseqüente aumento na demanda por transporte marítimo levaram a PETROBRAS a buscar ferramentas para aumentar a eficiência de seu transporte marítimo. Neste sentido, a atividade de programação de navios busca alocar cargas a um conjunto de navios, respeitando restrições comerciais e operacionais, a fim de transportá-las ao menor custo possível. Este artigo propõe um sistema de suporte à decisão (SSD) baseado em otimização para a programação de navios, que foi desenhado especificamente para a atividade de programação de navios de longo curso de petróleo da PETROBRAS. Os testes comparativos realizados com o protótipo do SSD utilizando dados reais mostraram que a ferramenta apresenta um potencial de redução de custo significativo. O SSD proposto se apresentou como uma opção viável para auxiliar a programação de navios na busca pela redução de custos de transporte marítimo.

PALAVRAS CHAVES: Programação de Navios, Programação Linear Inteira, Sistema de Suporte à Decisão.

ABSTRACT

The increasing production of Brazilian oil and the consequent increase in the demand for shipping, led PETROBRAS to seek tools to increase the efficiency of its shipping. In this sense, the activity of ship scheduling seeks to assign vessels to a set of cargos, respecting business and operational restrictions in order to transport them with the lowest possible cost. To assist the ship scheduling planner in this activity, this paper proposes an optimization based decision support system (DSS) for ship scheduling. The proposed DSS was designed specifically for the long-term tanker scheduling activity at PETROBRAS and it was implemented based on models available in the academic literature. The comparative tests using the DSS prototype proposed in this dissertation showed that it has a potential for significant cost reduction. The proposed DSS was considered a viable tool to assist the ship scheduling planners in reducing shipping costs.

KEY WORDS: Ship Scheduling, Integer Linear Programming, Decision Support System.

1. Introdução

O transporte marítimo é um dos mais importantes modais de transporte. Atende cerca de 80% do volume de mercadorias comercializadas internacionalmente e é a única opção eficaz, em termos de custo, para o transporte de grandes volumes entre continentes (Norstad *et al.*, 2010). Somente no ano de 2009, cerca de 7,8 bilhões de toneladas de carga foram transportadas no mundo através do modal marítimo. O transporte de petróleo e seus derivados é responsável por cerca de 34% deste total.

No Brasil, a exportação do petróleo vem crescendo em função do aumento da produção local. O volume de petróleo nacional exportado subiu de 18,6 mil barris por dia (bpd) no ano de 2000 para 631,4 mil bpd em 2010. A PETROBRAS, a maior empresa de energia do Brasil, produziu no ano de 2010 2.004 mil bpd, mais de 97% da produção brasileira. Para transportar todo este volume de petróleo e derivados a companhia conta atualmente com uma frota de 147 navios tanques controlados sem contar com navios de terceiros que são afretados no mercado *spot* para transportar as cargas excedentes. Diante do desenvolvimento das reservas de petróleo do pré-sal, a expectativa é que a exportação de petróleo e derivados aumenta cada vez e, conseqüentemente, a demanda por transporte marítimo também sofreria considerável aumento.

Neste contexto, a preocupação com o aumento do custo de transporte marítimo é fundamental. Embora o custo do transporte marítimo seja pequeno em relação ao valor do petróleo (Glen e Martin, 2002), em termos absolutos, o valor é bastante significativo, considerando o valor do barril do petróleo e os grandes volumes movimentados.

Com o objetivo de redução de custos, a atividade de programação de navios passa a ganhar mais importância no contexto da operação dos navios. Segundo Fagerholt e Lindstad (2007) a programação de navios lida com a alocação de um conjunto de cargas aos navios da frota que estão disponíveis, buscando minimizar os custos relacionados com a operação. Atualmente encontra-se na literatura uma boa quantidade de estudos que propõem modelos de otimização para problemas de programação de navios. Embora, o interesse acadêmico neste tema tenha aumentado a partir dos anos 90, a maioria dos estudos encontrados têm sido em um nível teórico e experimental, com foco em algoritmos de otimização. Poucos modelos apresentados na literatura foram aplicados em problemas reais (Fagerholt, 2004). Song e Furmam (2010) ainda destacam que poucos estudos publicados na literatura apresentam modelos aplicados com sucesso em casos reais, deixando uma avenida aberta para pesquisas futuras sobre este tema.

Diante do cenário apresentado e da carência de estudos sobre sistemas de suporte à decisão (SSD) para a programação de navios aplicados com sucesso em casos reais, o objetivo deste artigo é propor um SSD, baseado em um algoritmo de geração de programações, um avaliador de custos e um modelo de programação inteira onde a função objetivo minimiza os custos relacionados com a programação de navios. O SSD foi desenvolvido para gerir a frota de navios de forma mais eficiente. O SSD almeja auxiliar o programador a buscar sempre a programação com menor custo operacional, respeitando as restrições físicas, operacionais e comerciais relacionadas com as cargas a serem transportadas.

Este artigo está organizado em cinco seções, sendo esta introdutória. A segunda seção oferece uma revisão bibliográfica sobre o problema de programação de navios. A seção 3 descreve a situação atual da programação de navios de longo curso dentro da PETROBRAS e apresenta o modelo de SSD proposto. A seção 4 apresenta e analisa os resultados dos testes computacionais realizados com o protótipo do modelo proposto para validar e comprovar a economia que pode ser gerada com a sua aplicação. A seção 5 apresenta as conclusões e recomendações para pesquisas futuras.

2. Revisão da literatura acadêmica

Problemas de otimização em programação de navios já são estudados há bastante tempo. A literatura oferece trabalhos científicos sobre o tema desde a década de 50. Quando Flood (1954) propôs um modelo de otimização de custos diante de uma frota militar de navios tanque homogêneos e um programa de movimentação de cargas de petróleo. Flood (1954) utilizou o método *simplex* desenvolvido por Dantzig para minimizar a distância em lastro

percorrida pelos navios da frota, entendendo que desta forma estaria minimizando os custos de operação dos navios. Outro estudo pioneiro sobre otimização em programação de navios é Appelgren (1969), que foi o primeiro estudo a utilizar a abordagem de geração de colunas em um problema de programação de navios. Gronhaug *et al.* (2010) ressalta que a abordagem por geração de colunas é fundamental para alguns casos descritos na literatura, onde o problema se torna tão grande que gerar todas as programações factíveis o tornaria intratável.

Christiansen *et al.* (2004) destacam que o estudo sobre programação de navios recebeu um grande impulso no meio acadêmico a partir da pesquisa feita por Brown *et al.* (1987). Seu modelo aborda problemas restritos, onde é possível utilizar um gerador de colunas que cria um conjunto completo de programações factíveis. Muitos trabalhos sobre otimização em problemas de programação de navios foram desenvolvidos posteriormente utilizando uma abordagem semelhante à apresentada por Brown *et al.* (1987), inclusive o modelo apresentado neste artigo. Dada sua relevância para este trabalho, seu estudo e outros que seguiram sua estrutura serão detalhados na Seção 2.1.

Os modelos de otimização em programação de navios podem ser organizados em otimização na programação de navios; a otimização na programação de navios identificando a velocidade ótima de cada navio em cada programação e o problema de otimização na programação de navios levando-se em conta a gestão de estoque nos pontos de carga e descarga.

Modelos para otimização na programação de navios podem ser encontrados em Flood (1954), Appelgren (1969), Fisher e Rosenwein (1989), Perakis e Bremer (1992), Kim e Lee (1997), Sheralli *et al.* (1999), Fagerholt (2004), Bronmo *et al.* (2007a,b) e Fagerholt e Lindstad (2007). Neste tipo de problema, a função objetivo do modelo pode visar a minimização do custo, se o operador for um *industrial shipping*, onde o transportador também é o dono da carga, ou maximizar o lucro, no caso de um operador *tramp shipping*, onde o transportador possui uma frota de navios e simplesmente oferece um serviço de frete.

A programação de navios com otimização de velocidade passou a receber bastante atenção na academia devido ao alto custo do combustível. Segundo Ronen (1982), o custo do *bunker* é o principal gasto operacional de um navio. Tanto Ronen (1982), quanto Norstad *et al.* (2010) dizem que a relação entre a velocidade do navio e o consumo de combustível pode ser aproximada por uma função cúbica. Portanto, se a velocidade de um navio for reduzida em cerca de 20%, então a redução no consumo de *bunker* pode chegar a 50%. Alguns autores passaram a abordar o problema de programação de navios incluindo o parâmetro velocidade como uma variável de decisão do problema. Portanto, busca pela velocidade ótima do navio em cada rota, respeitando as restrições operacionais, pode ser encontrada nos estudos de Brown *et al.* (1987), Bausch *et al.* (1998), Fagerholt (2001) e Norstad *et al.* (2010).

Mais recentemente, principalmente a partir do final da década de 90, observa-se um aumento do interesse no estudo do problema de programação de navios com gestão de estoque nos pontos de carga e descarga (Christiansen *et al.*, 2004). Neste tipo de problema a função objetivo continua sendo a minimização do custo do transporte marítimo ou maximização do lucro decorrente da atividade, porém considerando a taxa de produção nos pontos de carregamento, assim como as restrições de tancagem nestes locais. Da mesma forma, também são considerados as restrições de tancagem e a taxa de consumo nos pontos de descarga dos navios. Este tipo de problema é muito comum na produção e processamento de grãos líquidos, onde qualquer perda de produção representa grandes perdas econômicas. Christiansen e Nygreen (1998), Christiansen (1999), Ronen (2002), Person e Gothe-Lundgren (2005), Al-Kayyal e Hwang (2007), Gronhaug *et al.* (2010), Song e Furman (2010) e Furman *et al.* (2011) são alguns dos trabalhos encontrados sobre este tipo de problema.

2.1. Abordagem de Brown *et al.* (1987) e estudos subsequentes

Brown *et al.* (1987) estudaram o caso de uma grande empresa de petróleo (uma *major*) que tinha que prover o transporte de petróleo do Oriente Médio para a Europa e Estados Unidos. Para solucionar este problema o modelo apresentado busca identificar uma programação onde, dentro de um horizonte de tempo de aproximadamente três meses, todas as cargas possam ser

transportadas a um custo mínimo. Seu modelo tem quatro etapas principais, que posteriormente foram utilizadas com algumas variações por outros autores, sendo elas: **1ª etapa:** um gerador de programações que cria um conjunto completo de programações factíveis para atender todas as cargas disponíveis; **2ª etapa:** um avaliador de custos que calcula os custos de todas as programações geradas; **3ª etapa:** um modelo de programação inteira que encontra a combinação de programações que minimiza o custo de operação da frota; e **4ª etapa:** um procedimento de solução eficiente que é aplicado ao problema.

Uma das dificuldades encontradas ao utilizar este tipo de estrutura se trata do número de programações factíveis existentes em cada problema. Brown *et al.* (1987) chamam de programações factíveis àquelas que atendam aos requisitos operacionais relacionados com cada navio, porto, carga e a relação entre eles. O problema estudado em Brown *et al.* (1987) era um problema restrito, o que permitiu a geração de todas as programações factíveis na primeira etapa. Esta mesma situação pode ser encontrada em Kim e Lee (1997), Bausch *et al.* (1998), Christiansen and Fagerholt (2002) e Brønmo *et al.* (2007b).

Em outros problemas o número de programações factíveis possíveis é muito grande, o que aumenta muito o tempo de processamento. Neste caso Fisher e Rosenwein (1989) e Perakis e Bremer (1992) lançaram mão de heurísticas para redução do número de programações geradas, a fim de viabilizar o modelo. Christiansen *et al.* (2004) afirmam que o método de geração de programações pode ser através de heurística ou por otimização, dependendo da qualidade da solução desejada e do tempo disponível para processamento dos dados. Appelgren (1969) apresenta um algoritmo que utiliza a decomposição de Dantzig-Wolfe, que é a base para a geração de colunas, para solucionar o problema. A abordagem de geração de colunas propõe decomposição do problema em um problema principal e um subproblema reduzindo a quantidades de colunas geradas, a fim de se chegar a uma programação ótima. A abordagem de geração de colunas vem sendo encontrada em diversos estudos na literatura acadêmica, como Christiansen e Nygreen (1998), Christiansen (1999), Person e Gothe-Lundgren (2005) e Gronhaug *et al.* (2010).

3. Descrição do SSD proposto

O objetivo da atividade de programação de navios longo curso de petróleo na PETROBRAS é programar os navios para atender cargas de importação e exportação de petróleo, atendendo as faixas de carga e descarga acordadas com os fornecedores e clientes e buscando o menor custo de operação da frota. O volume de exportação de petróleo em 2010 foi de 501 mil barris (bbl) e o volume de óleo importado foi de 316 mil bbl no mesmo ano, volumes que tendem a aumentar, de acordo com o cenário previsto no plano de negócio da companhia.

A programação de navios é feita manualmente seguindo indicadores de sobrestadia e eficiência dos navios. Os programadores buscam reduzir o tempo de sobrestadia dos navios e aumentar a eficiência dos mesmos, que é medida com um indicador que calcula a tonelada milha navegada dividida pela tonelada milha ideal. Nenhum sistema de suporte à decisão baseado em otimização existe na companhia para auxiliar na tomada de decisão dos programadores.

O SSD proposto foi adaptado à realidade da atividade de transporte marítimo de longo curso de petróleo da PETROBRAS. Esta adaptação considerou hipóteses para fins de simplificação e viabilização do SSD: considerou-se que todas as cargas possuem apenas um porto de carga e um porto de descarga, onde o navio é totalmente carregado no primeiro porto e totalmente descarregado no segundo; o modelo não diferencia o volume das cargas, considerando apenas a programação de cargas com o lote padrão de 950 mil a 1.000 mil barris; devido à premissa anterior, o modelo programa apenas navios do porte do suezmax totalmente carregados; e considera-se uma velocidade de navegação dos navios padrão e constante de 13,5 nós.

Fagerholt (2004) justifica a importância de simplificar o modelo, afirmando que seria muito difícil modelar todas as informações e restrições necessárias para a aplicação do problema. Além disso, mesmo que fosse possível modelar todas as restrições existentes, isto demandaria muito trabalho manual do usuário para inserir dados e parâmetros, tornando a programação muito trabalhosa e pouco funcional. Portanto, restrições como aceitação dos navios por clientes e

fornecedores, restrições de calado, falhas em equipamentos, que impedem a operação dos navios em determinados terminais, e outras restrições diversas não foram modeladas no SSD proposto.

A estrutura do SSD segue as 4 etapas de Brown *et al.* (1987). A **1ª etapa** cria um conjunto completo de programações factíveis para atender todas as cargas disponíveis através de um algoritmo de geração de programação. Por se tratar de um problema restrito e com horizonte de programação curto, de até sessenta dias, torna-se viável a geração de todas as programações factíveis na primeira etapa do modelo. Portanto, assim como Brown *et al.* (1987), Kim e Lee (1997), Bausch *et al.* (1998), Christiansen e Fagerholt (2002) e Brønmo *et al.* (2007b), é utilizado um processo de geração de todas as programações factíveis através de um algoritmo de geração de rotas. O algoritmo de geração de programações é dividido em dois passos. O primeiro passo gera todas as rotas possíveis, respeitando as faixas de carga e descarga definidas pela área comercial. Cada rota é formada simulando a viagem de um navio visitando um porto de carga, o de descarga correspondente e em seguida se posicionando em um ponto de carregamento em potencial. Em seguida cada uma das rotas formadas é testada, a fim de verificar se outra carga pode ser atendida por um mesmo navio na sequência, ainda respeitando as faixas de carga e descarga definidas comercialmente. Os testes continuam até que nenhuma carga possa ser adicionada em uma rota já formada. O segundo passo testa os navios da frota controlada em cada uma das rotas geradas no passo anterior, respeitando as faixas de carregamento e a posição e data de disponibilidade de cada um dos navios. As programações factíveis são formadas a partir da compatibilidade entre um navio e uma rota, ou seja, sempre que um determinado navio puder atender uma determinada rota forma-se uma programação. O teste segue avaliando todos os navios da frota controlada ao longo de todas as rotas formadas no primeiro passo do algoritmo. É importante ressaltar que todas as programações terminam reposicionando o navio em um ponto de carregamento potencial. Appelgren (1969) resalta a importância do custo de reposicionamento e diz que embora seja difícil de estimar, o custo de operação do próximo período de programação vai depender da posição inicial do navio naquele período, ou seja, da posição final do navio no período atual.

A **2ª etapa** calcula os custos de todas as programações geradas na etapa anterior. Assim como Ronen (1982), Brown *et al.* (1987), Fisher e Rosenwein (1989), Perakis e Bremer (1992) e Christiansen e Fagerholt (2002), o modelo desenvolvido considera os seguintes componentes de custo: custo diário, custo de sobrestadia, custo de combustível, custos portuários e custo de afretamento no mercado *spot*. Em linha com Perakis e Bremer (1992), no modelo apresentado, não é levantado todo o custo da operação, mas apenas os custos impactados com a decisão de programação, ou seja, aqueles que podem sofrer alteração dependendo da programação que for adotada para cada navio. Desta forma, os custos fixos não são considerados pelo avaliador de custos do modelo. O custo de combustível dos sistemas auxiliares é considerado irrelevante diante dos custos totais envolvidos na atividade de transporte marítimo, portanto também não são levados em consideração pelo modelo.

Na **3ª etapa** um modelo de programação inteira encontra a combinação de programações que minimiza o custo de operação da frota. Na terceira etapa, as programações geradas na primeira etapa junto com os custos calculados na segunda etapa são utilizados para a construção de um modelo matemático de programação inteira (MPI) que busca minimizar o custo de operação da frota como um todo. A formulação do modelo aplicado neste SSD segue um modelo básico apresentado por Christiansen *et al.* (2004), mas que também foi utilizado por Kim e Lee (1997) e Bausch *et al.* (1992) com algumas alterações. Como Christiansen *et al.* (2004) não considera a possibilidade de algum navio da frota ficar em sobrestadia e, este é um risco real no caso da companhia estudada. Então, foram acrescentados no modelo os custos relativos aos navios em sobrestadia, conforme apresentado por Bausch *et al.* (1992).

Foi utilizada a seguinte notação no MPI:

Conjuntos:

| Cód. | Índice | Nome | Descrição |
|------|--------|----------------------|--|
| VS | v | Frota Selecionada | Conjunto dos navios controlados disponíveis para atender ao menos uma das cargas do horizonte de planejamento. |
| N | i | Cargas | Conjunto de cargas compradas ou vendidas a serem transportadas. |
| Rv | r | Rotas por navio | Conjunto das rotas candidatas relacionadas com os navios que podem atendê-las. |

Parâmetros:

| Cód. | Nome | Descrição | Unidade |
|-----------|-------------------------------|---|---------|
| C_{vr} | Custo | Custo do navio v na rota r | Dólar |
| a_{ivr} | Constante | Parâmetro que identifica se a carga i pode ser transportada pelo navio v seguindo a rota r. | {0,1} |
| $Cspot_i$ | Custo do navio spot | Custo do navio spot para transportar cada carga i | Dólar |
| $Idle_v$ | Custo do navio em sobrestadia | Custo do navio que fica em sobrestadia durante o horizonte de programação | Dólar |

Variáveis de decisão:

| Cód. | Descrição | Domínio |
|----------|---|---------|
| x_{vr} | Variável que decide qual navio será alocado em qual rota | {0,1} |
| s_i | Variável que decide se a carga i será transportada por navio spot ou controlado | {0,1} |
| $Idle_v$ | Variável que decide se o navio fica em sobrestadia durante o horizonte de programação | {0,1} |

Função objetivo:

$$\min \sum_{v \in VS} \sum_{r \in Rv} C_{vr} * x_{vr} + \sum_{i \in N} Cspot_i * s_i + \sum_{v \in VS} ICost_v * Idle_v \quad (1)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{v \in VS} \sum_{r \in Rv} a_{ivr} * x_{vr} + s_i = 1, \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{r \in Rv} x_{vr} + idle_v = 1, \forall v \in VS \quad (3)$$

Onde:

$$x_{vr} \in \{0,1\}, s_i \in \{0,1\}, Idle_v \in \{0,1\}, \forall v \in VS, r \in Rv, \forall i \in N \quad (4)$$

A equação (1) representa a função objetivo, que busca minimizar os custos relacionados com a operação do navio, mais os custos com eventuais contratações de navios *spot* e os custos com algum navio em sobrestadia.

A equação (2) restringe e garante que toda carga só pode ser atendida por um único navio, seja ele controlado ou um navio *spot*.

A equação (3) restringe e garante que todos os navios da frota controlada que estejam disponíveis sejam alocados em somente uma única programação ou estejam em sobrestadia.

A equação (4) apresenta o conjunto universo de cada uma das variáveis do sistema.

Em fim, na **4ª etapa**: um procedimento de solução eficiente é aplicado ao problema, ou seja um *solver* comercial é aplicado para solucionar o problema de programação inteira. No protótipo desenvolvido foi utilizado a plataforma de otimização AIMMS®, que embora possua diversos *solvers* disponíveis, o *CPLEX* foi utilizado para otimizar o problema.

4. Protótipo e análise dos resultados

A fim de validar o modelo proposto, foi desenvolvido um protótipo utilizando os *softwares* Microsoft Excel® e AIMMS®. No Microsoft Excel® são inseridos todos os dados necessários para reproduzir o ambiente de programação de navios e, para efeito de comparação de resultados, também são inseridas a programação manual e a programação após ajustes do programador. A programação após ajustes acontece quando a programação indicada pelo SSD viola alguma restrição não modelada no sistema. Quando isso acontece, o programador efetua alterações na indicação do SSD, a fim de tornar esta indicação em uma programação factível. Já o AIMMS® processa quatro etapas em sequência. Primeiro, os dados são importados do Microsoft Excel®; depois são pré-processados gerando as rotas, as programações e calculando os custos relativos às programações; em seguida, o modelo matemático é resolvido, visando minimizar o custo de operação dos navios; e, na última etapa, o AIMMS® importa do Microsoft Excel® os dados referentes à programação manual e à programação após ajustes e calcula o custo destas programações sob os mesmos critérios utilizados pelo modelo.

O protótipo foi testado durante os três primeiros meses de 2012 na atividade de programação de navios de longo curso de petróleo da PETROBRAS. Enquanto os programadores de navios executavam sua atividade de programação normalmente, como sempre fizeram, o protótipo foi alimentado com as mesmas informações disponíveis para os programadores e periodicamente eram geradas programações. Estas eram atualizadas sempre que ocorria alguma mudança no cenário, tais como alteração na data e posicionamento dos navios, alteração nas datas e locais de carregamento e descarga, por exemplo. Sempre que o protótipo gerava uma programação, os programadores faziam uma validação desta, analisando restrições e oportunidades não modeladas no SSD e que poderiam inviabilizar alguma indicação do SSD. Caso exista alguma restrição não modelada, o programador faz um ajuste na indicação do SSD a fim de torná-la uma programação factível. Assim, os resultados das três programações são comparados entre si, verificando informações como custo de contratação de navios *spot* e sobrestadia. Os resultados foram registrados e são apresentados ao final desta seção.

4.1. Dados e testes

A fim de testar o protótipo na atividade de programação de navios de longo curso de petróleo da PETROBRAS, foi necessário obter uma série de dados e parâmetros iniciais para reproduzir o ambiente de transporte marítimo no modelo. Os dados de entrada foram divididos em três grupos: os dados iniciais ou fixos; os dados dos cenários; e os dados das cargas.

Os dados ou parâmetros iniciais foram chamados de dados fixos e se referem a informações como: nome dos navios, consumo de *bunker* de cada navio em cada tipo de operação, velocidade de navegação, nome dos portos de carga e descarga, tempo de operação em

cada um dos portos, custos portuários e distância entre os portos. Dados estes semelhantes aos utilizados em Christiansen e Fagerholt (2002).

Os dados dos cenários são informações temporárias que variam ao longo do tempo e devem ser atualizadas a cada nova rodada do modelo. Sempre que ocorrer alguma alteração no ambiente de programação, uma nova instância pode e deve ser avaliada. Exemplos típicos de alterações no cenário de programação são: atrasos ou antecipações na previsão de disponibilidade de algum navio; alteração de data ou local de carregamento ou ainda de descarga; oscilações no custo do *bunker*; ou ainda alteração no custo de frete no mercado *spot*. Estes tipos de informações são muito dinâmicas ao longo do tempo, portanto é importante mantê-las sempre atualizadas conforme preconizado em Kavussanos e Alizadeh (2002). Os dados dos cenários são os seguintes: local e data de abertura dos navios, custo de frete dos navios no mercado *spot*, custo de *bunker* e o custo de oportunidade do navio (*daily value*).

Os dados relativos às cargas que devem ser transportadas (dados das cargas) são obtidos de um sistema chamado de PIMEX. Neste sistema são alimentadas todas as informações relativas às cargas de importação e exportação de petróleo, conforme as cargas vão sendo compradas e vendidas pela área comercial. Cada carga recebe um código sequencial, que será utilizado como chave pelo modelo. As informações pertinentes relacionadas às cargas são: porto de carregamento, porto de descarga, data de início e fim da faixa de carregamento e data de início da faixa de descarga. Estas informações devem ser atualizadas a cada rodada de programação.

Para validar o modelo em um caso real, os testes tiveram que ser efetuados em tempo de programação, ou seja, ao mesmo tempo em que os programadores executavam suas atividades. As mesmas informações que os programadores dispunham eram utilizadas para alimentar o modelo a fim de obter uma comparação realista e sob os mesmos critérios.

O teste segue o procedimento descrito na Figura 1 a seguir. É importante ressaltar a etapa 6, onde o programador avalia e valida a indicação de programação do modelo. Caso alguma das programações indicadas não seja factível, então devem ser feitos os ajustes necessários para tornar esta programação factível. Os resultados das três programações: do modelo, do programador e a ajustada são registrados para análise final.

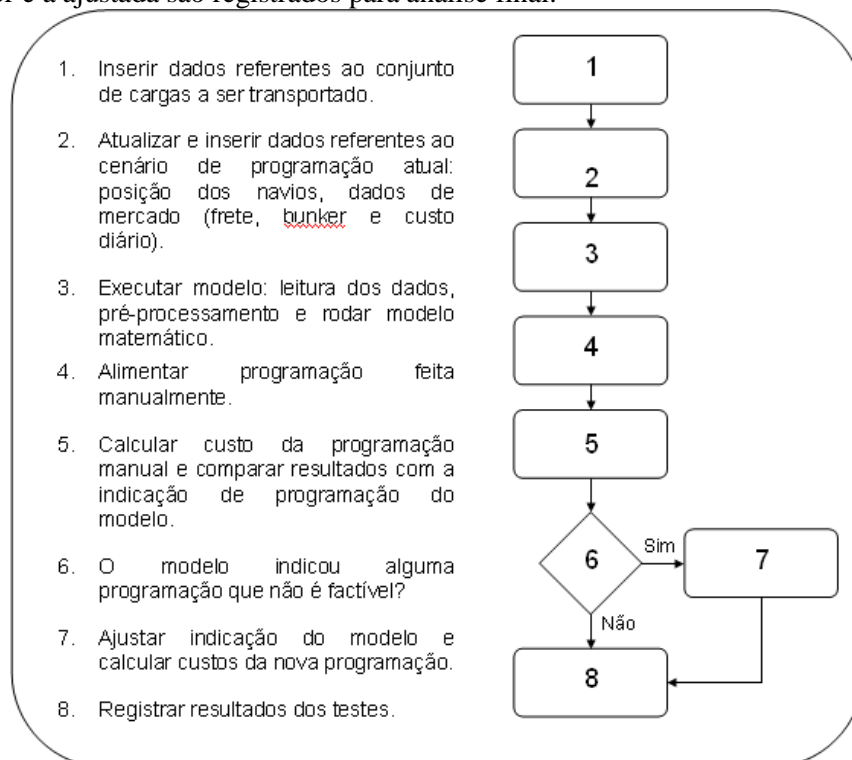


Figura 1: Fluxograma do método para testes do protótipo

4.2. Análise dos resultados

Nesta seção são apresentados as análises dos resultados das 12 instâncias testadas. A Tabela 1 consolida os resultados dos testes e está estruturada em quatro blocos de informação. O primeiro conjunto de dados apresenta informações gerais sobre a programação de cada instância, como a data em que foi realizada, o número de cargas de exportação, de importação e o número de navios programados. O segundo bloco apresenta os resultados da programação feita manualmente (atual realidade da empresa), com duas colunas: quantidade de navios *spot* e de navios em sobrestadia indicados pelos programadores. O terceiro bloco de informações apresenta os resultados da programação do SSD com quatro colunas: programações geradas, quantidade de navios *spot*, quantidade de navios em sobrestadia e a redução de custos comparados com a solução indicada pelo programador. O último conjunto de informações apresenta as informações referentes à indicação do SSD após os ajustes efetuados pelos programadores. As colunas indicam quantidade de navios *spot* necessários, quantidade de navios em sobrestadia e a redução de custos relativa se comparada com a programação manual. Nota-se que nem todas as instâncias necessitaram de ajustes, isto ocorreu nas ocasiões em que a indicação do SSD foi aceita pelos programadores, pois todos os requisitos foram atendidos pelo modelo. As reduções de custos marcadas em negrito são aquelas reduções que foram efetivamente atingidas.

| Instâncias | | | | | Resultados do Programador | | Resultados do Modelo | | | | Resultado após ajustes | | | |
|------------|--------------------|------|------|-------|---------------------------|-------------|----------------------|------------------|-------------|----------------|------------------------|-----------------------------------|----------------|------------------|
| Nº | Data | Exp. | Imp. | Total | Navios prog. | Navios spot | Navios ociosos | Progr. Factiveis | Navios spot | Navios ociosos | Redução de Custo | Navios spot | Navios ociosos | Redução de Custo |
| 1 | 17 janeiro, 2012 | 8 | 9 | 17 | 10 | 7 | 1 | 201 | 7 | 0 | 9,4% | SEM NECESSIDADE DE AJUSTES | | |
| 2 | 23 janeiro, 2012 | 7 | 5 | 12 | 8 | 7 | 3 | 72 | 6 | 2 | 6,9% | 7 | 3 | 0,6% |
| 3 | 26 janeiro, 2012 | 5 | 4 | 9 | 7 | 2 | 0 | 92 | 2 | 0 | 8,5% | 2 | 0 | 8,3% |
| 4 | 1 fevereiro, 2012 | 8 | 5 | 13 | 13 | 4 | 4 | 194 | 4 | 4 | 13,3% | 4 | 4 | 10,4% |
| 5 | 7 fevereiro, 2012 | 9 | 5 | 14 | 10 | 5 | 2 | 244 | 4 | 0 | 12,7% | SEM NECESSIDADE DE AJUSTES | | |
| 6 | 13 fevereiro, 2012 | 9 | 7 | 16 | 11 | 6 | 2 | 211 | 5 | 0 | 10,7% | SEM NECESSIDADE DE AJUSTES | | |
| 7 | 17 fevereiro, 2012 | 7 | 9 | 16 | 10 | 7 | 1 | 194 | 6 | 0 | 6,5% | SEM NECESSIDADE DE AJUSTES | | |
| 8 | 24 fevereiro, 2012 | 9 | 6 | 15 | 12 | 5 | 3 | 227 | 4 | 1 | 15,4% | 5 | 2 | 8,4% |
| 9 | 2 março, 2012 | 11 | 5 | 16 | 11 | 7 | 2 | 187 | 5 | 0 | 11,7% | 6 | 1 | 8,5% |
| 10 | 0 janeiro, 1900 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0% | SEM NECESSIDADE DE AJUSTES | | |
| 11 | 16 março, 2012 | 6 | 6 | 12 | 10 | 2 | 0 | 187 | 2 | 0 | 1,7% | SEM NECESSIDADE DE AJUSTES | | |
| 12 | 23 março, 2012 | 4 | 6 | 10 | 7 | 3 | 0 | 113 | 3 | 0 | 5,2% | SEM NECESSIDADE DE AJUSTES | | |

Tabela 1: Comparativo de Resultados

Analisando e comparando a quantidade de navios em sobrestadia e a quantidade de navios *spot* contratados por viagem, verifica-se que somente em uma das instâncias testadas o modelo indicou a contratação mais navios no mercado *spot* do que o programador. Isto por si só já indica que a programação do modelo terá um custo menor do que a programação manual. Também é interessante observar que para cada instância o modelo considerou a análise de 72 a 291 alternativas de programação, quantidade esta impossível de ser analisada manualmente por um programador em tempo de programação, por mais experiente que ele seja.

Diante do número de alternativas avaliadas e dos resultados descritos, não é surpresa o fato de que em todas as instâncias testadas, a programação indicada pelo SSD obteve custo menor do que a programação feita manualmente pelo programador, até porque a função objetivo do modelo matemático utilizado no SSD é minimizar custo. Esta redução de custo variou entre 1,7% e 15,4% em relação ao custo da programação manual, embora algumas das instâncias tiveram que ser ajustadas alterando a redução de custo.

Embora os resultados apresentados tenham se mostrado bastante satisfatórios, conforme destacou Fagerholt (2004), o modelo proposto não pode contemplar todas as restrições inerentes à atividade de programação de navios. Portanto, durante a etapa de análise e validação das indicações do SSD pelos programadores, foi identificado que algumas das programações indicadas foram consideradas inviáveis, pois não atendiam certas restrições que não haviam sido contempladas na modelagem do SSD. Situação esta que já era esperada, dado que não era intenso do SSD representar as restrições relativas ao transporte marítimo em sua amplitude. Sendo assim, pode-se dizer que a redução de custo obtida com a programação do SSD é uma redução potencial, pois ainda pode sofrer alterações dependendo da análise dos programadores.

Após validação dos programadores, cinco das doze programações indicadas pelo SSD não atendiam alguma restrição operacional ou comercial não modelada. Diante disto, algumas alterações foram feitas na indicação do SSD a fim de permitir que a programação se tornasse factível. Após as alterações efetuadas pelos programadores, ainda assim, foi observada redução de custo em todas as cinco programações ajustadas, alcançando um valor máximo de 10,4% na quarta instância. A próxima subseção descreve algumas observações levantadas pelos programadores durante etapa de validação.

4.3. Análise e validação dos resultados do SSD

Nesta etapa dos testes, os programadores buscaram encontrar observações importantes na indicação de programação do SSD de forma a criticar e validar os resultados obtidos a partir do modelo. Entre as observações notadas podem se destacar: rotas pouco usuais indicadas pelo SSD; oportunidades comerciais não inseridas no modelo, como cargas a serem compradas ou vendidas; navios recusados pelos parceiros comerciais; e navio chegando muito próximo ao fim da faixa de carregamento, trazendo maior risco de perda de faixa. Estas foram algumas das situações encontradas na fase de validação e não haviam sido consideradas pelo SSD por terem natureza diversa e imprevisível.

Cabe ressaltar que a participação do programador nesta etapa é fundamental, pois um programador experiente possui um conhecimento tácito muito grande acumulado ao longo dos anos de experiência e que muitas vezes não pode ser modelado em sistemas. Portanto, esta interação entre sistema e programador é fundamental para a efetiva aplicação do SSD. Se por um lado a experiência e a validação dos programadores são essenciais para a completa aplicação do SSD na atividade de programação, o SSD também traz novas perspectivas, com as quais os programadores não estão habituados, quebrando certos paradigmas da programação de navios. A seguir são descritas algumas situações indicadas pelo SSD que, durante os testes, surpreenderam os programadores e contribuíram para alcançar um custo de transporte menor. A alocação de navios da frota controlada para cargas de exportação com destino Califórnia foi uma surpresa, por se tratar de uma rota sem carga de retorno; o mesmo ocorreu com a preferência por alocar navios *spot* para cargas de exportação com destino Caribe. Ambos os exemplos, são programações não usuais para os programadores e chamaram a atenção por estarem reduzindo o custo unitário de frete.

Pode-se perceber que a escolha das melhores cargas a serem transportadas por navios *spot* foi decisiva para a redução de custos apresentada nos testes. Esta é uma grande vantagem da utilização do SSD, pois ao analisar todas as alternativas de alocação de navios, controlados ou *spot*, para atender todas as cargas no horizonte de programação, o SSD indica as melhores cargas a serem transportadas por navios *spot*, ou seja, aquelas que quando transportadas por navios *spot* irão contribuir para reduzir o custo de transporte marítimo.

Conforme exemplificado acima e certificado nos testes, o modelo busca sempre a minimização dos custos, portanto em algumas ocasiões são apresentadas programações que contrariam a experiência dos programadores e apresentam alternativas não convencionais, segundo os padrões desenvolvidos pelos analistas. Os “vícios de programação” adotados pelos programadores são decorrentes da experiência adquirida ao longo dos anos e partem do pressuposto de que na maioria das vezes a alternativa habitual é melhor do que as alternativas não usuais. O problema é que isto nem sempre é verdade e, portanto, nas vezes em que a opção

habitual não é a melhor, isto pode passar por despercebido pelo programador, que utiliza a programação “viciada” sem perceber que pode estar deixando de economizar em outras programações.

5. Conclusão

Diante da expectativa do aumento do transporte marítimo de petróleo e derivados no Brasil para os próximos anos e da escassez de estudos aplicados com sucesso sobre SSD baseados em otimização para programação de navios, este artigo tem por objetivo propor um SSD que busca auxiliar na programação de navios da maior empresa de energia do Brasil. Este SSD visa à redução do custo unitário de transporte marítimo da empresa estudada, respeitando as restrições comerciais e operacionais envolvidas na atividade. O SSD foi adaptado à realidade da atividade de programação de navios de longo curso de petróleo da empresa estudada e os resultados da aplicação do protótipo mostraram que o SSD foi efetivo, atingindo o objetivo de reduzir custos operacionais em todas as doze instâncias avaliadas, mesmo após a validação e os ajustes efetuados pelos programadores, quando foram necessários. A utilização do SSD permite ao programador encontrar programações com menores custos, menos contratação de navios *spot* e maior eficiência dos navios, reduzindo o tempo de sobrestadia dos mesmos. A validação das indicações do SSD pelos programadores é fundamental para garantir que algumas restrições particulares e não modeladas sejam atendidas na programação final. A associação dos resultados do SSD baseado em otimização à experiência dos programadores garante reduções consideráveis no custo de transporte e aplicação com sucesso do modelo em um caso real. De forma geral, a aceitação do SSD pelos programadores foi boa, embora estes ainda tenham se apresentado céticos quanto às programações que não iam de encontro a alguns hábitos de programação adquiridos com a experiência.

Durante o decorrer da elaboração deste estudo verificou-se um amplo leque de oportunidades para novos estudos e aplicações de diversas soluções inovadoras encontradas na literatura acadêmica para problemas relacionados com transporte marítimo. Pode-se destacar: acrescentar à pesquisa atual a possibilidade de programar navios de outros portes, podendo assim cobrir todas as cargas de exportação de petróleo e aumentando a complexidade do problema, devido à programação de navios heterogêneos (portes diferentes); incluir no modelo apresentado a possibilidade de transportar cargas opcionais utilizando navios da frota controlada, quando estiverem ociosos e isto for agregar financeiramente à companhia; adaptar o modelo proposto para períodos a partir de um ano, permitindo assim a utilização do modelo com o fim de dimensionamento da frota; estudar o problema de programação de navios onde a velocidade do navio é mais uma variável do problema, permitindo ao modelo minimizar custo de operação, e otimização o consumo de combustível; e estudar a programação de navios de cabotagem tanto de petróleo quanto de derivados, que acrescentam ao problema a gestão de estoque nos pontos de carregamento e nos pontos de descarga, transformando o problema em um problema de programação de navios com gestão de estoque.

Referências

- Al-Kayyal, F., Hwang, S-J.** (2007), Inventory constrained maritime routing and scheduling for multi-commodity liquid bulk, Part I: Applications and model, *European Journal of Operational Research*, 176, 106-130.
- Appelgren, L.** (1969), A column generation algorithm for a ship scheduling problem. *Transportation Science*, 3, 53–68, 1969.
- Bausch, D. O.; Brown, G. G. Ronen, D.** (1998), Scheduling short-term marine transport of bulk products. *Maritime Policy and Management*, 5, 4, 335-348.
- Bronmo G., Christiansen, M. e Fagerholt, K., Nygreen, B.** (2007a), A multi-start local search heuristic for ship scheduling – a computational study, *Computer & Operational Research*, 34, 900-917.
- Bronmo, G., Christiansen, M., Nygreen, B.** (2007b), Ship routing and scheduling with flexible cargo sizes, *Journal of Operational Research Society*, 58,9,1167–1177.

- Brown, G. G., Graves, G. W. e Ronen D.** (1987), Scheduling ocean transportation of crude oil, *Management Science*, 33, 3, 335–346.
- Christiansen, M. e Fagerholt, K.** (2002), Robust Ship Scheduling with Multiple Time Windows, *Naval Research Logistics*, 49, 6, 611-625.
- Christiansen, M., Fagerholt, K. e Ronen D.** (2004), Ship Routing and Scheduling: Status and Perspectives, *Transportation Science*, 38, 1, 1–18.
- Christiansen, M., Nygreen, B.** (1998), A method for solving ship routing problems with inventory constraints, *Annals of Operations Research*, 81, 357-378.
- Christiansen, M.** (1999), Decomposition of a Combined Inventory and Time Constrained Ship Routing Problem, *Transportation Science*, 33, 1, 3-16.
- Fagerholt, K.** (2001), Ship scheduling with soft time windows: An optimization based approach, *European Journal of Operational Research*, 131, 559-571.
- Fagerholt, K.** (2004), A computer-based decision support system for vessel fleet scheduling-experience and future research, *Decision Support Systems*, 37, 35-47.
- Fagerholt, K. e Lindstad, H.** (2007), TurboRouter: An Interactive Optimisation-Based Decision Support System for Ship Routing and Scheduling, *Maritime Economics & Logistics*, 9, 214–233.
- Fisher, M. L. e Rosenwein, M. B.** (1989), An Interactive Optimization System for Bulk-Cargo Ship Scheduling, *Naval Research Logistics*, 36, 27-42.
- Flood, M. F.** (1954), Application of Transportation Theory to Scheduling a Military Tanker Fleet, *Journal of the Operations Research Society of America*, 2, 2, 150-162.
- Furman, K.C., Song, J., Kocis, G.R., McDonald, M.K. e Warrick, P.H.** (2011), Feedstock Routing in the ExxonMobil Downstream Sector, *Interfaces*, 41, 149-163.
- Glen, D. e Martin, B.** (2002), The tanker market: Current structure and economic analysis, *The Handbook of Maritime Economics and Business*, 251–279.
- Gronhaug, R., Christiansen, M., Desaulniers, G. e Derosier, J.** (2010), A Branch-and-Price Method for a Liquefied Natural Gas Inventory Routing Problem, *Transportation Science*, 44, 3, 400–415.
- Kavussanos, M. G. e Alizadeh-M, A. H.** (2002), Seasonality patterns in tanker spot freight rate markets, *Economic Modeling*, 19, 747-782.
- Kim, S. e Lee, K.** (1997), An Optimization-based Decision Support System for Ship Scheduling, *Computers Industrial Engineering*, 33, 3-4, 689-692.
- Norstad, I., Fagerholt, K. e Laporte, G.** (2010), Tramp ship routing and scheduling with speed optimization, *Transport Research*, 19, 853 – 865.
- Perakis, A. N. e Bremer, W. M.** (1992), An operational tanker scheduling optimization system: Background, current practise and model formulation, *Maritime Policy Management*, 19, 177-187.
- Person, J. A. e Gothe-Lundgren, M.** (2005), Shipment planning at oil refineries using column generation and valid inequalities, *European Journal of Operational Research*, 163, 631-652.
- Ronen, D.** (1982), The effect of oil price on the optimal speed of ships, *The Journal of the Operational Research Society*, 33, 11, 1035-1040.
- Ronen, D.** (2002), Marine inventory routing: shipment planning, *Journal of the Operational Research Society*, 53, 108-114.
- Sherali, H. D., Al Yakoob, S. M. e Hassan, M.M.** (1999), Fleet management models and algorithms for an oil-tanker routing and scheduling problem, *IIE Transactions*, 31, 395-406, 1999.
- Song, J. e Furman, K. C.** (2010), A maritime inventory routing problem: Practical approach, *Computers & Operations Research*.