

UMA HEURÍSTICA DE INSERÇÃO PARA O TRANSPORTE MARÍTIMO DE PRODUTOS COM RESTRIÇÕES DE JANELAS DE TEMPO E DE ATRACAMENTO

Vitória Pureza

Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos

Via Washington Luiz, km 235 – São Carlos, SP – CEP: 13565-905

vpurezza@dep.ufscar.br

Resumo

O transporte marítimo de produtos é uma área fértil de aplicação de técnicas de pesquisa operacional. Este trabalho considera a situação em que o transporte seja acionado por pedidos, cada qual definido pela carga a ser transportada de uma unidade produtora para uma unidade consumidora, assim como janelas de tempo para o início da coleta e da entrega da carga. Com vistas à resolução do problema, é proposta uma heurística de inserção que fornece para cada navio disponível, a sequência e programação de visitas, considerando restrições nos locais de coleta e entrega que limitam os tipos de navios que podem atracar e o número de carregamentos/descarregamentos simultâneos. Resultados de experimentos descritivos envolvendo conjuntos de exemplos gerados a partir de instâncias da literatura são reportados.

Palavras-chave: Logística da distribuição, Roteamento de navios, Janelas de tempo, Métodos heurísticos. Logística e Transporte.

Abstract

Maritime transportation of products is a fertile area of application of operations research techniques. This work addresses the situation in which such transport is triggered by requests, each of which defined by the cargo to be collected from a production unit and delivered to a consumption unit, as well as times windows for starting the pickup and the delivery of the requested cargo. In order to treat the problem, it is proposed an insertion heuristic that provides for each available ship, the sequencing and scheduling of its visits, considering constraints that limit the types of ships that can dock at the ports and the number of simultaneous loading/unloading operations. Results of descriptive experiments involving sets of generated examples based on instances of literature are reported.

Key-words: Distribution Logistics, Ship routing, Time windows, Heuristics.

1. Introdução

No problema de coleta e entrega (*Pickup and Delivery Problem - PDP*), um conjunto de rotas é elaborado de forma a atender pedidos de transporte de mercadorias ou pessoas. Cada pedido é caracterizado por um único local de coleta (origem) e um único local de entrega (destino), e uma frota de veículos é disponibilizada para execução das rotas. Restrições intrínsecas ao problema impõem que a capacidade dos veículos não seja violada em nenhum momento, que a visita ao local de entrega seja realizada depois da visita ao local de coleta (ainda que não imediatamente), e que o mesmo veículo que serve o local de coleta sirva também o local de entrega. Como os itinerários e programações dos veículos são elaborados com base em solicitações de clientes, é comum a presença de janelas de tempo especificando o período em que o serviço deve começar em um ou ambos os locais.

Conforme discutido em Bent e Hentenryck (2006), muitas aplicações da vida real envolvem atividades de coleta e entrega. Dentre estas incluem-se o transporte de pessoas com restrições de tempo máximo de viagem (Cordeau e Laporte, 2003), a programação de aeronaves (Shangyao *et al.*, 2008), a programação de helicópteros que transportam pessoas e suprimentos em plataformas *offshore* de prospecção de petróleo (Menezes *et al.*, 2010) e o transporte no mesmo dia de correspondências e pequenas encomendas por empresas de *courier* (Mitrović-Minić *et al.*, 2004). O objetivo mais comum na elaboração das rotas é o de minimização do custo total, o qual pode compreender o custo fixo dos veículos utilizados e o custo variável relativo à distância percorrida.

Este estudo aborda um problema enfrentado por companhias envolvidas no transporte de cargas de produtos químicos entre unidades industriais produtoras e unidades industriais consumidoras. As unidades produtoras devem operar de forma contínua em função do consumo alto e também contínuo das unidades consumidoras, assim como dos custos elevados decorrentes da interrupção da produção. Como resultado, o escoamento da produção é uma atividade crítica para o controle dos estoques entre seus níveis mínimo e máximo em ambos os tipos de unidades. Além dessas características, as unidades (ou seus pontos de despacho/recepção) estão localizadas próximas à costa marítima, de maneira que o transporte das cargas é realizado por uma frota de navios. Exemplos de aplicações reais são encontrados no transporte marítimo de amônia (Christiansen, 1999), cimento (Christiansen, 2011) e gás natural liquefeito (Halvorsen-Weare e Fagerholt, 2013).

O sistema aqui tratado considera que o transporte dos produtos seja acionado por pedidos (ordens), cada qual definido pela carga a ser transportada de uma unidade produtora para uma unidade consumidora, assim como janelas de tempo para o início da coleta e da entrega da carga. As janelas de tempo são o mecanismo utilizado para controle (indireto) de estoque. Com vistas à resolução do problema, é proposta uma heurística de inserção que fornece para cada navio disponível, a sequência e programação de visitas, considerando restrições de atracamento de navios nos locais de coleta e entrega. Estas restrições limitam os tipos de navios que podem atracar em cada porto e o número de carregamentos e descarregamentos simultâneos, por sua vez, definido pela quantidade de berços disponíveis. São reportados os resultados de experimentos computacionais descritivos envolvendo 54 exemplos gerados a partir de instâncias da literatura para o PDPTW.

O restante deste artigo é organizado como se segue. A Seção 2 apresenta uma breve revisão da literatura considerada particularmente relevante para este trabalho. A Seção 3 descreve o problema tratado em maior detalhe e a Seção 4 apresenta e discute a heurística proposta. Experimentos e resultados computacionais são descritos na Seção 5, seguido de conclusões e próximos passos da pesquisa na Seção 6.

2. Transporte marítimo de produtos

O transporte marítimo de produtos é uma área fértil de aplicação de técnicas de pesquisa operacional, conforme observado no número expressivo de artigos publicados (veja, por exemplo, Brown *et al.*, 1987; Graves *et al.*; 2005; Kobayashi e Kubo, 2010; Hennig *et al.*, 2012; e Song e Furman, 2013), e nas compilações de Ronen (1983, 1993) e Christiansen (2004, 2013). No que diz respeito ao transporte de produtos a granel (*bulk products*), o roteamento de navios pode ser classificado como sujeito a restrições de carga ou a restrições de estoque (Al-Khayyal e Hwang, 2007).

Nos problemas com restrições de estoque (*inventory routing*), decisões de roteamento e programação dos navios estão sujeitas diretamente ao controle de estoque dos produtos nos pontos de coleta e/ou entrega. Nos problemas com restrições de carga, os portos de coleta e de entrega especificam cargas com quantidades demandadas dos produtos, geralmente impondo janelas de tempo para o início do carregamento e descarregamento.

Christiansen (1999) propõe um modelo de programação linear inteiro misto para o problema de coleta e entrega monoproduto com restrições de janelas de tempo. As quantidades carregadas nas unidades produtoras e descarregadas nas unidades consumidoras precisam respeitar a capacidade dos navios e são definidas pelas taxas de produção e consumo e por níveis máximo e mínimo de estoque. Em Al-Khayyal e Hwang (2007), o modelo anterior é estendido para o caso multiproduto com carregamento/d Descarregamento simultâneo de múltiplos navios no mesmo porto. As dificuldades do controle de estoque na ocorrência de sobreposição de visitas são tratadas impondo-se que o estoque de um dado produto no início da visita de um navio i seja igual ao estoque do produto no fim da visita do navio imediatamente antecessor a i . Christiansen *et al.* (2011) propõem uma heurística construtiva para endereçar a situação em que a demanda de pico dos produtos excede a capacidade da frota, e considera restrições de atracamento nos portos e de mistura de produtos durante o transporte. Bausch *et al.* (1989), por sua vez, tratam a distribuição de produtos líquidos entre fábricas, centros de distribuição e clientes. As cargas são pré-designadas aos navios e especificadas janelas de tempo para as datas de carregamento de todos os produtos. Para cada navio, são geradas todas as programações factíveis e selecionada a melhor programação.

3. Descrição do problema

O problema endereça o transporte marítimo de grandes volumes de um ou mais tipos de produtos com vistas ao escoamento da produção de unidades produtoras a unidades consumidoras pertencentes a uma mesma empresa. Cada unidade produtora produz continuamente um único produto, enquanto cada unidade consumidora demanda um ou mais produtos, também de forma contínua.

Cada pedido de transporte é determinado *a priori* a partir da análise das taxas de produção e consumo dos produtos, definindo o par <unidade produtora-unidade consumidora> e sua carga associada. As unidades têm capacidade de estocagem limitada, e a manutenção do estoque dentro de seus limites mínimo e máximo é realizada de forma indireta pela imposição de janelas de tempo para o início da coleta e da entrega de cada pedido. Violações no limite superior de suas janelas de tempo são permitidas apenas em casos extremos, uma vez que resultam na interrupção da produção e/ou consumo.

O transporte dos produtos é realizado por uma frota de navios heterogênea, bem dimensionada, e contratada por um período relativamente longo. Em cada ponto de coleta e de entrega pode existir limitações nas áreas de atracamento que restringem os tipos de navios que podem realizar o transporte àqueles com um valor máximo de calado e loa. Além disso, como os pontos de coleta e de entrega podem estar associados a diferentes pedidos, é possível o carregamento ou descarregamento simultâneo de dois ou mais navios no mesmo ponto. O

número de carregamentos ou descarregamentos simultâneos é, entretanto, limitado ao número máximo de berços no porto de cada ponto (cada berço comporta um único navio por vez). Cada navio inicia sua rota no ponto de sua última entrega no horizonte de planejamento anterior (ou em um local próximo a esse ponto em função de limitações do número de berços) e termina sua rota no ponto de sua última entrega no horizonte de planejamento atual (ou em um local próximo a esse ponto). Em outras palavras, as rotas são abertas, não havendo um "depósito" central de onde se originam e terminam as rotas.

Neste estudo, os objetivos principais na elaboração das rotas são o de minimização da violação dos limites superiores das janelas de tempo das unidades produtoras e consumidoras e dos custos variáveis (distância total percorrida). Além disso, é desejável a utilização de toda a frota e o balanceamento da carga coletada entre os navios utilizados. Desta forma, não só a carga de trabalho é distribuída de forma mais equânime entre as tripulações, mas também as "folgas" de capacidade entre os navios. Com isso, acredita-se que as soluções resultantes tendam a ser mais robustas e capazes de lidar com situações imprevistas, como um pedido urgente que surge depois que os navios estão em rota.

4. A heurística de inserção

No início do horizonte de planejamento (de comprimento T), tem-se o conjunto P de pedidos, suas características (nó de coleta, nó de entrega, carga, janelas de tempo), e particularidades dos pontos associados (número de berços e navios compatíveis). Sabe-se também os instantes de suas liberações dos navios da frota para atendimento de um novo pedido, suas posições e carga nos instantes de liberação.

A fim de minimizar a violação dos limites superiores das janelas de tempo dos pedidos, a heurística possui duas fases. Na primeira fase (RELAX=falso), pedidos inicializam e são inseridos em rotas em construção segundo critérios de distância e balanceamento de carga desde que satisfaçam todas as restrições do problema. Caso haja pedidos não servidos e nenhuma inserção adicional ou inicialização de uma nova rota seja possível (a frota é limitada e heterogênea), na segunda fase (RELAX=verdadeiro), o limite superior da janela de tempo do nós é relaxado e se continua a inserção.

Passos gerais da heurística

1. Seja r (número de rotas)=0 e RELAX=falso. Seja P o conjunto dos p pedidos (nó de coleta, nó de entrega) a serem servidos.
2. Para cada pedido i em P , obtenha o melhor navio dentre os disponíveis que podem inicializar uma rota com i .

Disponibilidade dos navios: A disponibilidade de um navio depende não só de sua compatibilidade com os portos dos pontos de coleta e entrega do pedido, mas também da disponibilidade de berços nesses portos. Como os berços são tidos como idênticos (veja Seção 5.1), um navio é considerado disponível se o número de sobreposições de serviço com outros pedidos já planejados e utilizando o mesmo porto não excede o número de berços, uma vez que somente um navio por vez pode atracar em cada berço.

Seleção do navio: Dentre as opções de navios disponíveis, selecione aquele que pode finalizar o pedido no menor tempo sem violar as janelas de tempo dos nós de coleta e entrega (se RELAX=falso) ou violando o limite superior das janelas de tempo dos nós (se RELAX=verdadeiro).

∴ Ao final do passo, tem-se associado um navio específico $bestship_i$ a cada

pedido i , ou a informação de que i não pode ser servido pelos navios disponíveis.

3. Selecione dentre os pedidos em P , o pedido i^* com o mínimo:

$$l_i \times m_i$$

onde l_i é o limite superior de janela de tempo do nó de coleta de i e m_i é o nº de navios disponíveis para servir i .

Faça $r = r + 1$ e inicialize r com i^* e faça sua programação de forma que o navio parta o mais cedo possível para atender ao pedido. A rota r é servida pelo navio $bestship_{i^*}$, o qual deixa de estar disponível para servir outras rotas. Atualize o conjunto P .

4. Retorne ao passo 2 caso haja pelo menos um pedido não servido que possa inicializar uma rota.

∴ Ao final do passo, tem-se um conjunto de rotas (cujo número é possivelmente igual ao número de navios disponíveis da frota) compostas por um único pedido.

5. Para cada pedido não servido i obtenha a melhor posição de inserção de seu nó de coleta e de entrega considerando todas as rotas existentes. Em uma dada rota, são consideradas elegíveis todas as posições para o nó coleta e o nó de entrega que respeitem as restrições de precedência, capacidade do veículo, janelas de tempo dos nós (se RELAX=falso) ou que violem os limites superiores das janelas (se RELAX=verdadeiro). As considerações sobre disponibilidade dos berços se mantêm nesse passo.

Como critérios de avaliação das inserções, utilizou-se:

C₁) Aumento em distância percorrida na rota.

C₂) Desvio padrão da carga com a inserção.

Se RELAX=falso, o custo de uma posição de inserção de um pedido não servido é dado por

$$C = C_1 + \alpha C_2, \text{ onde } \alpha \geq 0 \quad (1)$$

Caso contrário, o custo C é dado pela soma das violações das janelas de tempo dos nós que seriam provocadas pela inserção. Se b_i é o início do serviço do pedido i , a violação da janela de tempo de i é calculada por

$$\text{Max}(b_i - l_i, 0) \quad (2)$$

∴ Ao final do passo, tem-se para cada pedido i não servido, a melhor rota $r(i)$, a posição de inserção factível do nó de coleta e de entrega, e o custo C associado da inserção, ou a informação de que não há posições elegíveis para o pedido. Computa-se também para cada i o número total de posições de inserção elegíveis ($count1$) e o número de rotas que apresentam inserções factíveis ($count2$).

6. Dentre os pedidos com posições de inserção elegíveis, selecione i^* com o menor

$$\text{Custo} = C \times \sqrt{\text{count1}} \times \text{count2}$$

e o insira na rota $r(i^*)$ na posição associada e faça sua programação. Atualize o conjunto P .

7. Retorne ao passo 5 caso haja pelo menos um pedido não atendido e posições de inserção elegíveis. Caso haja pedidos não servidos, RELAX=falso e nenhuma posição de inserção factível faça RELAX=verdadeiro e retorne ao passo 2.

Ao fim da aplicação da heurística, obtém-se um plano em que cada navio v utilizado termina sua rota com a realização da visita a um nó de entrega j em um instante de tempo t_v , o qual pode ser menor, igual ou maior que o comprimento do horizonte de planejamento T adotado. Note que nos casos de rotas em que $t_v \leq T$, o instante de liberação do navio v para atendimento de pedidos no próximo horizonte de planejamento é igual a 0. Ou seja, o navio aguardaria o início do novo horizonte próximo ao nó da última entrega realizada para continuar sua rota com novos pedidos. Nos casos em que $t_v > T$, uma estratégia usual é manter a visita planejada a j ; o instante de liberação do navio v corresponde ao fim do serviço em j . Se j é um nó de coleta, a visita ao nó de entrega também permanece na rota. Isso é feito também para pedidos cujo nó de coleta foi visitado antes do fim do horizonte de planejamento e o nó de entrega não. Pedidos cujos nós de coleta não foram visitados durante o horizonte de planejamento anterior seriam retirados da rota e reincluídos no conjunto P . Inserções de pedidos na rota do navio v no próximo horizonte de planejamento podem ser feitas a partir do nó j .

5. Experimentos computacionais

Os experimentos têm como objetivo analisar as soluções da heurística obtidas para dois grupos de exemplos com diferentes características temporais (veja seção 5.1), com ênfase na relação entre os critérios utilizados na elaboração das rotas. Especificamente, deseja-se verificar o impacto da valoração do balanceamento de carga (definido pelo parâmetro α) nos objetivos principais de minimização de tempo de operação com violação das janelas de tempo e da distância total percorrida.

5.1 Geração das instâncias

Foram gerados 54 exemplos a partir das instâncias de Li e Lim (2001) para o problema de coleta e entrega com janelas de tempo, mono-depósito e frota homogênea. As instâncias originais têm um número de pedidos (pares de nós de coleta e de entrega) que varia entre 50 e 53, e estão divididas em 6 grupos, cada qual com características acerca da distribuição dos nós no plano bidimensional (aleatória, agrupada, e mista) e temporais (janelas de tempo largas ou estreitas). As instâncias são definidas pelos seguintes dados: número de veículos, capacidade dos veículos, identificador de cada nó, coordenadas de cada nó, demanda de cada nó (negativa se de entrega, positiva se de coleta e zero se depósito), limites inferior e superior da janela de tempo de cada nó, tempo de serviço em cada nó, e identificador do nó predecessor e sucessor de cada nó (se o nó é de coleta (entrega), seu predecessor (sucessor) é denominado 0).

Para cada instância base I_b , seguiu-se o seguinte procedimento após a leitura dos dados:

1. Os nós de coleta e de entrega de I_b representam, respectivamente, as unidades produtoras e consumidoras do sistema, e denominadas POs (pontos operacionais).
2. O nó depósito de I_b é ignorado.
3. O horizonte de planejamento é igual a 1236 para todos os exemplos gerados.
4. O número de berços para cada PO de coleta é 1. Para os POs de entrega é gerado aleatoriamente entre 1 e 3.
5. Seja n o número total de POs. O número de pedidos (p) é gerado aleatoriamente na faixa $[0,5 \times n, 1,2 \times n]$.
6. A frota é composta por $maxfleet=24$ navios classificados em três tipos (1, 2 ou 3) com 11, 6 e 7 navios respectivamente. Por simplicidade, a capacidade de todos os navios é idêntica e igual a de I_b . O tipo de um dado navio h é definido aleatoriamente, mantendo-se os números de cada tipo.
7. As coordenadas da posição inicial de cada navio são geradas aleatoriamente entre 0 e 99. Essas posições definem nós, o que incrementa o número de nós do grafo do

exemplo em *maxfleet*. A carga inicial da frota é zero e seu instante de liberação para atendimento de um novo pedido é zero.

8. As distâncias entre os nós são euclidianas e simétricas.
9. Os dados de cada pedido são gerados como se segue:
 - i. Faz-se $i=1$ (identificador do pedido).
 - ii. Seleciona-se aleatoriamente um PO de coleta j , o qual tem seu correspondente PO de entrega k . Assim, o pedido identificado como $i=1$, tem como nó de coleta o PO j e como nó de entrega o PO k .
 - iii. O passo ii é repetido, incrementando-se i até se atingir o número de pedidos gerado no passo 5. Note que o mesmo par de POs coleta/entrega pode definir mais de um pedido.
 - iv. A demanda de cada nó de coleta de um pedido é gerada aleatoriamente segundo a função $\text{Max}(10, \text{Demanda do PO } j + U(-10,10))$. A demanda de seu nó de entrega é o negativo deste valor. As coordenadas e janelas de tempo do PO j (PO k) são mantidas no nó de coleta (entrega) do pedido. O número de berços no nó de entrega do pedido é o número de berços do PO j gerado no passo 4.
 - v. A seleção dos tipos de navio que podem atender um dado PO é feita aleatoriamente. Cada tipo tem probabilidade de 50% de poder servir o PO, porém garante-se que cada pedido i possa ser atendido por pelo menos um tipo de navio.

Os 54 exemplos gerados apresentam de 53 a 122 pedidos. Como para cada exemplo, a escolha dos POs é feita aleatoriamente, não é possível afirmar que as distribuições dos nós das instâncias originais tenham sido mantidas. Entretanto, podem ainda ser classificados pelo tipo de janela de tempo, ou seja, estreitas (grupo 1) e largas (grupo 2).

5.2. Resultados

A heurística descrita na Seção 4 foi implementada em Delphi 7.0 (Borland) e executada em um *notebook* Intel® Core™ i7, 2,00 GHz e 2,00 GB de RAM. Quatro execuções com valores fixos do parâmetro que define o peso do balanceamento de carga na avaliação de inserções candidatas ($\alpha = 0, 1, 2, 4$) foram realizadas para cada exemplo.

A Tabela 1 apresenta os resultados médios obtidos com os dois grupos de exemplos. Para cada α , são apresentados a distância total percorrida (coluna DIST), o tempo total das rotas (coluna TRoutes), o desvio padrão da carga na solução (coluna DPcarga), o número de pedidos com violação de janela de tempo (coluna NVio), a violação de janelas de tempo (coluna TVio), o número de atendimentos simultâneos de dois ou mais navios em um mesmo porto (NASim). Tempos computacionais para resolução de cada exemplo são inferiores a 10 segundos, e por esta razão não são apresentados na tabela. O número de rotas também não é incluído, uma vez que a frota foi totalmente utilizada em todos os exemplos, ou seja, perfazendo exatas 24 rotas. A Tabela 2 apresenta os incrementos percentuais na distância total (coluna %DIST), tempo total das rotas (coluna %TRoutes), número de pedidos com violação de janela de tempo (coluna %NVio) e número de pedidos com violação de janela de tempo (coluna %NVio) com cada $\alpha > 0$ em relação às soluções obtidas com $\alpha = 0$.

Tabela 1 - Resultados médios para diferentes valores de α .

	α	DIST	TRotas	DPCarga	NVio	TVio	NASim
Grupo 1 (janelas de tempo estreitas) 28 exemplos	0	2790,8	10432,6	26,2	24,0	3040,1	23,3
	1	2831,2	10492,6	25,7	24,2	3021,9	23,7
	2	2873,7	10435,9	25,5	23,5	2869,1	24,4
	4	2912,5	10482,0	24,9	25,0	2912,8	23,7
Grupo 2 (janelas de tempo largas) 26 exemplos	0	2967,8	24994,6	50,8	1,4	576,7	17,9
	1	2983,6	25438,2	47,0	1,5	581,7	17,8
	2	3008,4	25469,4	43,4	1,4	541,7	18,1
	4	3040,3	25617,9	38,8	1,6	687,0	17,8

Tabela 2 - Incremento percentual médio dos resultados médios com a valoração de α .

	α	%DIST	%TRotas	%NVio	%TVio
Grupo 1 (janelas de tempo estreitas)	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	1,4	0,6	0,7	-0,6
	2	3,0	0,0	-1,9	-5,6
	4	4,4	0,5	4,3	-4,2
Grupo 2 (janelas de tempo largas)	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	0,5	1,8	11,1	0,9
	2	1,4	1,9	2,8	-6,1
	4	2,4	2,5	16,7	19,1

Conforme observado na Tabela 1, ocorre em média cerca de 23 atendimentos simultâneos de dois ou mais navios em um mesmo porto para exemplos do grupo 1, e 18 atendimentos simultâneos para exemplos do grupo 2. Note, entretanto, que esse número chega a 58 atendimentos em alguns casos. O papel dos berços na qualidade das soluções é crucial e evidenciado ao resolvermos os exemplos adotando um único berço disponível por porto: a violação de janelas de tempo atinge 5185,5 unidades de tempo para o grupo 1 com $\alpha=0$, representando um incremento médio da violação de 70%. Para os exemplos do grupo 2, o incremento médio supera 300%.

Os resultados descritos na Tabela 1 também mostram que para os exemplos do grupo 1, o fato das janelas de tempo serem estreitas resulta em um número médio de violações não desprezível (atinge cerca de 24 nós por instância). Além disso, violações das janelas de tempo chegam a 29% do tempo total de rota. O balanceamento de carga claramente conflita com a distância, porém tende a reduzir as violações das janelas, atingindo um decréscimo percentual de 5,6% com $\alpha=3$ (Tabela 2). Esse resultado sugere que o balanceamento de carga pode ser vantajoso para exemplos com janelas de tempo estreitas, ainda que a um custo de deslocamento maior.

Para os exemplos do grupo 2, o fato das janelas de tempo serem largas, restringe bastante o número médio de violações (1,4 nós por instância) e as violações das janelas (cerca de 2,5% do tempo total de rota). O balanceamento de carga claramente conflita com a distância, ainda que de forma limitada; quando α é igual a 4, o aumento médio em distância é menos de 2,5% em relação às distâncias obtidas com $\alpha=0$. Entretanto, as violações de janelas de tempo apresentam um aumento de cerca de 19% (Tabela 2). Estes resultados sugerem que a valoração do balanceamento pode trazer perdas relativas não desprezíveis a outras medidas da qualidade da solução.

6. Conclusões e próximos passos da pesquisa

Neste artigo foi proposta uma heurística de inserção para o transporte marítimo de produtos entre nós produtores (coleta) e consumidores (entrega) com restrições de janelas de

tempo (para controle indireto do estoque) e atracamento dos navios, e os resultados de sua aplicação a exemplos gerados aleatoriamente a partir de instâncias da literatura. Além do roteamento e programação de cada navio, a heurística considera a disponibilidade de berços de atracamento no porto dos nós, endereçando de forma explícita o carregamento e descarregamento simultâneo de navios.

Os próximos passos da pesquisa consistem na extensão da heurística para considerar heterogeneidade de berços de cada porto e incorporar decisões de sequenciamento de navios nos berços. A heurística atual rejeita inserções de pedidos cujo atendimento em algum berço disponível provoque superposição de serviço com outro pedido já planejado, ignorando a possibilidade de postergar o início do serviço deste último (sem violação das janelas de tempo) para que a inserção do novo pedido seja factível. Tal variante pode trazer reduções nas violações. Note, entretanto, que o sequenciamento do berço em um dado porto é uma tarefa nada trivial, uma vez que afeta a programação das porções subsequentes das rotas dos navios que o utilizam, podendo provocar violações ao invés de reduzi-las.

Agradecimentos

Esta pesquisa teve o apoio do CNPq (processo 200895/2005-2).

Referências

- [1] Al-Khayyal, F. A. & 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 (1), 106-130.
- [2] Bausch, D. O.; Brown, G. G. & Ronen, D. (1998). Scheduling short-term marine transport of bulk products. *Maritime Policy and Management* 25(4), 335-348.
- [3] Bent, R. & Van Hentenryck, P. (2006). Two-stage hybrid algorithm for pickup and delivery vehicle routing problems with time windows. *Computers & Operations Research* 33(4), 875-893.
- [4] Brown, G. G.; Graves, G. W. & Ronen, D. (1987). Scheduling ocean transportation of crude oil. *Management Science* 33(3), 335-346.
- [5] Christiansen, M. (1999). Decomposition of a combined Inventory and time Constrained Ship Routing Problem. *Transportation Science* 33(1), 3-15.
- [6] Christiansen, M. (2004). Ship Routing and Scheduling: Status and Perspectives. *Transportation Science* 38(1), 1-18.
- [7] Christiansen, M.; Fagerholt, K.; Flatberg, T.; Haugen, Ø.; Kloster, O. & Lund, E. H. (2011) Maritime inventory routing with multiple products: A case study from the cement industry. *European Journal of Operational Research* 208(1), 86-94.
- [8] Cordeau, J-F. & Laporte, G. (2003). The Dial-a-Ride Problem (DARP): Variants, modeling issues and algorithms. *4OR - Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies* 1, 89-101.
- [9] Halvorsen-Weare, E. E. & Fagerholt, K. (2013). Routing and scheduling in a liquefied natural gas shipping problem with inventory and berth constraints. *Annals of Operations Research* 203(1), 167-186.
- [10] Hennig, F.; Nygreen, B.; Christiansen, M.; Fagerholt, K.; Furman, K. C.; Song, J-H.; Kocis, G. R. & Warrick, P. H. (2012). Maritime crude oil transportation – A split pickup and split delivery problem. *European Journal of Operational Research* 218, 764-774.

- [11] Kobayashi, K & Kubo, M. (2010). Optimization of oil tanker schedules by decomposition column generation, and time-space network techniques. *Japan Journal of Industrial Applied Mathematics* 27, 161-173.
- [12] Li, H. & Lim, A. (2001). A metaheuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, 160-167.
- [13] Menezes, F.; Porto, O.; Reis, M. L.; Moreno, L.; Aragão, M. P.; Uchoa, E. & Abeledo, H. Nascimento, N. C. (2010). Optimizing Helicopter Transport of Oil Rig Crews at Petrobras. *Interfaces*, 40(5), 408-416.
- [14] Mitrović-Minić, S.; Krishnamurti, R. & Laporte, G. (2004). Double-horizon based heuristics for the dynamic pickup and delivery problem with time windows, *Transportation Research Part B* 38, 669-685.
- [15] Ronen, D. (1983). Cargo ships routing and scheduling: Survey of models and problems, *European Journal of Operational Research* 12, 119-126.
- [16] Ronen, D. (1993). Ship Scheduling: the last decade. *European Journal of Operational Research* 71, 325-333.
- [17] Shangyao, Y.; Tang, C-H. & Fu, T-C. (2008). An airline scheduling model and solution algorithms under stochastic demands. *European Journal of Operational Research*, 190(1), 22-39.
- [18] Song, J-H. & Furman, K. C. (2013). A maritime inventory routing problem: Practical approach. *Computers & Operations Research* 40(3), 657–665.