

Algoritmo para Resolução do Problema de Programação do Transporte de Suprimentos para Unidades Marítimas de Exploração de Petróleo

Sérgio Renato Carmo Brejon

Doutorando

Depto. de Engenharia Naval, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo
Endereço: R. Fernando A. Sta. Cruz Oliveira, 71 casa 28 - Vila SF2 - Butantã
CEP 05386-290, São Paulo - SP - Brasil
Telefone: 55-11-91021466
email: sergiobrejon@uol.com.br

Marco Antônio Brinati

Professor Titular

Depto. de Engenharia Naval, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo
Endereço: Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - Prédio de Engenharia Mecânica e Naval
CEP 05424-970, Cidade Universitária, São Paulo - SP - Brasil
Telefone: 55-11-30915350
email: mabrinat@usp.br

RESUMO

Nas atividades de prospecção e produção de petróleo em campos marítimos são desenvolvidas uma série de tarefas. Um grupo de tarefas se refere ao transporte de suprimentos para as unidades de prospecção e produção, de modo a garantir que os suprimentos solicitados cheguem à unidade marítima solicitante na quantidade correta, dentro dos horários solicitados. A definição da composição de uma frota a ser empregada para atender a demanda das unidades marítimas e a determinação de quais embarcações da frota serão utilizadas para atender essa demanda de transporte num período específico de tempo, bem como a determinação dos roteiros dessas embarcações, delineiam um problema de transporte com características bem particulares. Esse problema é chamado de problema de dimensionamento e programação do transporte de suprimentos para unidades marítimas de exploração de petróleo (Problema de Transporte de Suprimentos).

Esse trabalho tem como objetivo propor um procedimento para a resolução do Problema de Transporte de Suprimentos no seu aspecto operacional de programação do transporte (PTS-P). Esse problema é descrito, analisado e classificado, sendo caracterizado como um Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Restrição de Janela de Tempo (PRPVRJT).

Por ser o PTS-P um problema restrito e pouco estudado, para o qual quase não existem procedimentos específicos de solução, a estratégia adotada foi o estudo de procedimentos de solução para problemas de roteirização com restrições de janela de tempo, com objetivo de identificar um procedimento que pudesse ser adaptado. Escolheu-se a heurística de inserção II de Solomon (1987), que foi adaptada para a resolução do PTS-P. O algoritmo

adaptado, chamado de APTSP, foi implementado em linguagem computacional. Seu desempenho foi comparado com o algoritmo ADPOFS anteriormente proposto por Brinati, Mesquita e Becker (1993), tendo sido possível melhorar a solução para o cenário em escala reduzida testado. O algoritmo também foi testado para resolução de um cenário em escala semi-real.

Palavras-chave: roteirização; roteirização de embarcações; heurística; algoritmo para programação de transporte

ABSTRACT

In open sea oil fields there are various tasks developed in offshore units used for drilling and production activities. Some tasks relate to supply transportation from land to the offshore units, making sure that all the requested supplies arrive at the right destination in the right time windows. Determining the maritime fleet size and composition necessary to attend the demand of supplies, and determining the schedules of each boat in the fleet in a certain period of time defines a very particular transportation problem. This problem is named fleet sizing and transportation scheduling of supplies to offshore units (Supply Transportation Problem).

This work presents a heuristic computerized procedure to solve the scheduling component of the Supply Transportation Problem (PTS-P). The problem is defined, analyzed and classified as a Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows (VRSPTW). The PTS-P is a very particular problem and has not been wide studied in the literature. To overcome this, it was adopted the strategy of researching procedures to solve the VRSPTW, looking for a procedure that could be adapted. The insertion heuristic I1 from Solomon (1987) was chosen, and adapted to resolve the schedule component of the Supply Transportation Problem. The adapted algorithm named APTSP was implemented in computational language. It's performance was compared to the ADPOFS algorithm early developed by Brinati, Mesquita et Becker (1993), with some improvements being reported in a small size scenario. The APTSP algorithm was also tested in a scenario's size near the size found in the real problem.

Keywords: routing; ship routing; heuristic.

1. Descrição do Problema de Transporte de Suprimentos

Na sua busca por auto-suficiência de petróleo, o Brasil tem feito prospecções no seu subsolo terrestre e no subsolo de sua plataforma continental. Atualmente, a maior parte do petróleo produzido no Brasil vem de campos marítimos, e a tendência é que essa participação aumente nos próximos anos. Nas atividades de prospecção e produção de petróleo em campos marítimos utilizam-se unidades marítimas diversas, como plataformas fixas, plataformas flutuantes e navios-sonda. Utilizam-se também embarcações de apoio, como navios de transporte de suprimentos, navios de combate a incêndio, rebocadores etc. As embarcações de apoio podem ser especializadas (por exemplo, uma embarcação que só faz transporte de suprimentos) ou de uso misto (por exemplo, uma embarcação de combate a incêndio que também é utilizada no transporte de suprimentos). Plataformas e navios-sonda (chamadas de unidades marítimas) são unidades envolvidas diretamente nas atividades de prospecção e produção, e necessitam de uma série de suprimentos: água, óleo diesel, alimentos, cimento, lama, tubos de perfuração, tubos de produção, além de materiais e equipamentos variados. O transporte desses produtos é realizado por embarcações de transporte de suprimentos com características operacionais diversas (tipo, tamanho, velocidade e capacidade de carga variados), considerando que a frota utilizada é totalmente afretada (contratada de terceiros).

As embarcações de transporte de suprimentos podem ser especializadas, como por exemplo um Supridor de Óleo, que só faz o transporte desse tipo de carga, ou podem transportar cargas múltiplas, como por exemplo os PSV (Pipe Supply Vessel). Existem ainda outras embarcações de apoio com atividades especiais, como por exemplo os RAS (Reboque e Manuseio de Âncoras) e embarcações de combate à incêndio, que também podem ser utilizadas no transporte de suprimentos. Uma das características principais dessa demanda de transporte decorre da necessidade de se garantir o provimento de alguns suprimentos em datas específicas. As atividades de produção e prospecção necessitam de um fluxo de suprimentos específico para cada fase das mesmas. Por exemplo, durante a perfuração de um poço necessita-se de uma grande quantidade de lama e produtos químicos. Esses produtos são utilizados dentro do poço, formando uma coluna que equilibra a pressão do gás dentro das rochas perfuradas, evitando o escape desse gás. Por restrições de espaço e de estabilidade, os suprimentos não podem ser armazenados em grande quantidade nas próprias unidades marítimas, devendo ser transportados regularmente a partir de um ponto de apoio no continente, ou base. O não atendimento da demanda de uma unidade marítima envolvida na prospecção ou produção de petróleo pode causar a interrupção do trabalho executado a bordo, podendo gerar uma grande perda econômica.

Esse panorama delinea um problema de transporte com características bem particulares. No nível tático-estratégico o problema consiste em definir, entre as embarcações disponíveis, uma composição para a frota a ser empregada para atender a demanda das unidades marítimas. No nível operacional o problema consiste em determinar quais embarcações da frota serão utilizadas para atender a demanda de transporte num período específico de tempo, e os roteiros dessas embarcações (Brinati, Mesquita e Becker, 1993). Trata-se de um problema bastante específico e de ocorrência restrita, já que poucos países além do Brasil exploram o petróleo na plataforma continental, necessitando para isso

utilizar embarcações para transportar suprimentos do continente para as unidades marítimas de exploração. Os trabalhos de Brinati et al (1991), Brinati, Mesquita e Becker (1993) e Botter, Souza e Borges (1996) descrevem esse problema em detalhes. A ordem de grandeza do problema real na Baía de Campos era de cerca de 50 embarcações para o atendimento de cerca de 60 unidades marítimas (Botter, Souza e Borges, 1996).

O problema pode ser resumido pelas seguintes características:

- a base tem uma localização geográfica determinada;
- cada unidade marítima tem uma localização geográfica determinada;
- a frota é composta de múltiplas embarcações;
- cada embarcação tem características operacionais próprias, com custos fixos e variáveis também próprios;
- cada embarcação pode transportar cargas diversas, em tanques/silos dedicados ou no convés;
- cada embarcação tem uma capacidade específica de cada tipo de carga e de carga total
- cada embarcação tem uma velocidade de serviço própria;
- cada embarcação tem um consumo de combustível e água potável próprio, que depende do tipo de operação (navegação, manobras, carga/descarga);
- a velocidade de transferência de cargas de tanques e silos das embarcações para as unidades marítimas está restrita à capacidade das bombas de cada embarcação;
- a velocidade de transferência de cargas de convés das embarcações para as unidades marítimas está restrita à capacidade dos guindastes de cada unidade marítima;
- cada carga tem características próprias em termos de fator de estiva, categoria (carga de convés ou de tanques e silos) e perecibilidade (tempo máximo de transporte);
- cada pedido de transporte (requisição) é caracterizado por um destino (unidade marítima requisitante), pelos tipos e quantidades de carga, pela data de entrega de cada carga e pela data em que cada carga fica disponível na base;
- as embarcações ficam indisponíveis quando termina o afretamento ou quando está previsto algum reparo;
- o problema é afetado por vários fatores aleatórios, como por exemplo o estado de mar, que pode alterar os tempos de viagem, e filas na base, que podem alterar os tempos de carregamento na base.

Em função dessas características, um procedimento de solução do Problema de Transporte de Suprimentos no seu aspecto operacional de programação do transporte (PTS-P) deve gerar os roteiros e a programação das embarcações considerando que:

- todas as requisições devem ser atendidas;
- as janelas de tempo dos clientes devem ser respeitadas, ou seja, as cargas não devem ser entregues antes ou depois do prazo estabelecido pelas unidades marítimas;
- a duração das viagens deve considerar a autonomia das embarcações (os tanques de óleo diesel e água para consumo próprio são os mesmos para atender a demanda);
- a duração das viagens também deve considerar as janelas de tempo das próprias embarcações (início e fim de afretamento, e períodos de indisponibilidade para manutenção)
- a alocação de cargas às embarcações deve respeitar as características das mesmas, em

termos de limite de capacidade global de carga e de limite de capacidade de cada tipo específico de carga;

- as unidades marítimas só podem ser visitadas por uma única embarcação por dia.

Algoritmo proposto por Brinati, Mesquita e Becker (1993)

O Problema de Transporte de Suprimentos foi estudado originalmente por Brinati, Mesquita e Becker (1993). Em seu trabalho intitulado de “Dimensionamento e programação do transporte de suprimentos para unidades marítimas de exploração de petróleo”, os autores apresentam e detalham o Problema de Transporte de Suprimentos. Os autores propõem também um procedimento de resolução, denominado algoritmo para dimensionamento e programação da frota de supridores (ADPOFS), que foi desenvolvido a partir das idéias básicas do algoritmo ADARTW proposto por Jaw et al (1986) para o Problema de Coleta e Entrega com Restrição de Janela de Tempo (“dial-a ride”). Segundo os autores, o algoritmo foi implementado e testado em cenários grandes, envolvendo 40 unidades marítimas, 60 embarcações e 2400 requisições para um período de 4 meses. A título de ilustração, o trabalho apresenta um exemplo numérico de pequena escala, envolvendo 5 unidades marítimas, 3 embarcações e 200 requisições para um período de 30 dias.

No item 6 (revisão bibliográfica) será analisada uma série de algoritmos propostos para a solução de problemas de roteirização e programação de veículos com restrição de janela de tempo, buscando-se identificar algum outro algoritmo que possa ser adaptado para a resolução do PTS-P. Antes, porém, será feita uma revisão sobre os problemas de roteirização.

2. Parâmetros que caracterizam um Problema de Roteirização

Os problemas de roteirização de veículos podem ser classificados em diversas categorias e tipos. Os vários problemas diferem entre si em aspectos relacionados ao tipo de operação, ao tipo de carga, ao tipo de frota utilizada, à localização dos clientes, ao tipo de restrições, ao tipo de função objetivo, e vários outros fatores.

A operação (ou serviço) executada no cliente pode ser de coleta ou entrega. Na primeira, a visita ao cliente é marcada pela coleta de mercadorias ou pessoas (é o que ocorre respectivamente na coleta de lixo e no transporte de passageiros por ônibus fretados que levam os passageiros ao trabalho). Na segunda, a visita ao cliente é marcada pela entrega de mercadorias ou pessoas. A carga a ser transportada pode ser de um único tipo, ou de vários tipos. A frota utilizada no transporte pode ser composta por um único veículo ou por vários veículos. Os veículos empregados podem ser todos iguais, ou podem ter capacidades, desempenhos, custos fixos e custos operacionais diferentes. Os veículos podem carregar um único tipo de carga ou podem levar vários tipos. Os veículos podem ser guardados (ou consertados, abastecidos, etc.) em um único depósito, ou então podem escolher entre vários depósitos existentes. Os clientes podem estar localizados de maneira dispersa ou ao longo das vias de transporte (por exemplo, é o que ocorre respectivamente na entrega urbana de encomendas e na entrega urbana de cartas). Além disso, os clientes podem exigir condições de serviço diversas, por exemplo, que sejam visitados num determinado horário, ou que

sejam visitados por um único veículo por dia. Diversas restrições podem ser relevantes. Por exemplo, restrições da via ao veículo, como limite de peso permitido e altura máxima; ou proibições de conversões à esquerda em entregas urbanas, por razões de segurança de trânsito. O objetivo a ser atingido na resolução do problema também pode variar. Por exemplo, pode-se desejar diminuir os custos fixos, operacionais ou totais. Ou pode-se tentar otimizar uma função de custo que incorpore também a satisfação do cliente.

A seguir serão listados os parâmetros mais relevantes e comuns, segundo Bodin e Golden (1981), Bodin et al. (1983), Assad (1988) e Ronen (1988):

- tipo de operação (coleta ou entrega, coleta/entrega simultaneamente, coleta (ou entrega) com carga retorno);
- tipo de carga (única, múltiplas cargas, necessidade de veículo especial para efetuar o transporte);
- tipo de demanda (determinística, estocástica);
- localização da demanda (localizada em arcos, em nós, ou localizada em arcos e nós);
- restrições junto aos clientes (necessidade ou não de atender toda a demanda, existência de clientes com prioridade, existência de janelas de tempo, tempo máximo permitido para carga/descarga, necessidade ou restrição de serviço em algum dia específico da semana);
- tamanho da frota (um único veículo, vários veículos);
- tipo de frota (homogênea, heterogênea, veículos especiais dedicados a um ou mais tipos de carga);
- localização dos veículos (em um único depósito, em vários depósitos);
- restrições dos veículos (autonomia, capacidade de carga, tipo de carga, restrições de carga e descarga);
- jornada de trabalho (duração, horário de almoço/interrupções, permissão para viagens de mais de um dia);
- número de tripulantes por veículo;
- pagamento dos tripulantes (por jornada de trabalho, por produtividade, jornada e horas extras);
- estrutura da rede (direcionada, não direcionada, mista, euclidiana);
- duração de rotas (imposta e igual para todas as rotas, imposta e diferente para cada rota, não imposta);
- restrições aos veículos (limite de peso, de altura, largura e comprimento do veículo; restrições de carga e descarga; número de rotas permitido por veículo);
- outras restrições (balanceamento da rota, pontos de parada/descanso, proibição de contornos à esquerda por questões de segurança, obrigatoriedade de se utilizar rotas pré-determinadas);
- estrutura de custos (custos variáveis, custos fixos);
- objetivos (minimizar custos variáveis, minimizar soma de custos fixos e variáveis, minimizar duração das rotas, minimizar a frota, maximizar função de utilidade baseada no nível de serviço e/ou satisfação e/ou prioridades dos clientes, balanceamento de rotas, minimizar o uso de frota contratada).

A seguir será visto como os problemas de roteirização são classificados em função dos diversos parâmetros aqui relacionados.

3. Classificação de Problemas de Roteirização de Veículos

Problemas de roteirização de veículos pertencem a uma categoria ampla de problemas de pesquisa operacional conhecida como Problemas de Otimização de Rede. Nessa categoria encontram-se problemas clássicos, como Problema de Fluxo Máximo, Problema do Caminho Mais Curto, Problema de Transporte, Problema de Designação (Golden, Ball e Bodin, 1981).

Uma das dificuldades de se modelar e resolver um problema de roteirização advém da grande quantidade de parâmetros que podem influenciar esse tipo de problema, conforme já foi descrito anteriormente. A classificação dos problemas de roteirização permite uma melhor compreensão dos aspectos mais relevantes, que devem ser considerados com maior atenção quando da proposição de algum procedimento de solução.

Os problemas são classificados em três categorias principais (Bodin e Golden, 1981 ; Bodin et al, 1983):

- Problemas de Roteirização de Veículos, onde não há restrições temporais por parte dos clientes (ou seja, não há nenhum horário pré-estabelecido), nem relações de precedência entre os clientes (ou seja, nenhum cliente precisa ser atendido especificamente antes ou depois de algum determinado cliente). Num problema desse tipo apenas os aspectos espaciais são levados em consideração, e o objetivo é construir um conjunto de rotas viáveis e de menor custo.
- Problemas de Programação de Veículos, quando a definição das rotas deve levar em consideração os horários pré-estabelecidos para cada atividade a ser executada (horário limite para chegada e nos pontos de demanda, horário limite para saída dos pontos de demanda, ou também o instante programado para outras tarefas como por exemplo horário de saída do depósito, parada para reabastecimento, etc.). Nesse tipo de problema, a elaboração das rotas leva em consideração, além dos aspectos espaciais do problema, também os aspectos temporais.
- Problemas Combinados de Roteirização e Programação de Veículos, quando existe algum tipo de restrição de precedência e/ou janela de tempo. Relações de precedência ocorrem, por exemplo, quando a entrega de uma mercadoria deve ser precedida pela sua coleta. Janelas de tempo são restrições horárias normalmente associadas ao intervalo desejado para que um dado serviço seja executado num cliente. Podem existir outros tipos de janela de tempo, como por exemplo o intervalo de tempo que um veículo fica disponível, ou o intervalo de tempo em que o depósito (ou depósitos) fica disponível aos veículos. Em problemas combinados tanto os aspectos espaciais quanto temporais são levados em consideração. Segundo Bodin e Golden (1981) os problemas que ocorrem na prática normalmente estão nessa categoria.

A descrição de problemas típicos de cada uma das três categorias principais de problemas de roteirização de veículos pode ser encontrada em Bodin et al (1983). A descrição dos problemas combinados, em particular, pode ser consultada em Solomon e Desrosiers (1988).

A classificação de um problema específico leva em consideração os parâmetros citados anteriormente. Em cada uma dessas três categorias encontramos alguns problemas típicos, com formulações propostas, e eventualmente com algoritmos de solução já desenvolvidos. Como se pode perceber pela grande quantidade de parâmetros, nem todas as combinações possíveis levam a algum problema já abordado na literatura, para o qual já exista uma modelagem proposta, e para o qual já tenha sido desenvolvido algum algoritmo de solução.

Os problemas de roteirização envolvendo embarcações, em particular, são pouco estudados na literatura. Ronen (1993) faz uma revisão bibliográfica de trabalhos que tratam dos problemas de roteirização e programação aplicados especificamente a embarcações. Ronen classifica os problemas de roteirização de embarcações em cinco grupos:

- Dimensionamento/composição e alocação de frota
- Problema combinado de roteirização e armazenagem
- Velocidade ótima de cruzeiro
- Programação de embarcações
- Problemas especiais

O PTS-P não se assemelha aos problemas revisados por Ronen nessas cinco classes. A mais próxima é a classe de programação de embarcações, mas a mesma se refere à programação de embarcações em rotas já determinadas (rotas comerciais), e não abrange o aspecto temporal referente à existência de janelas de tempo nos clientes.

4. Caracterização do problema de Transporte de Suprimentos no seu aspecto operacional de programação do transporte como um Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Restrição de Janela de Tempo (PRPVRJT)

A classificação de um problema de roteirização nem sempre é clara e precisa, pelo grande número de parâmetros existentes e pela falta de padronização. O Problema de Transporte de Suprimentos no seu aspecto operacional de programação do transporte pode ser classificado como pertencente à categoria de Problemas Combinados de Roteirização e Programação de Veículos. Essa classificação pode ser justificada pelo fato de que tanto os aspectos espaciais como temporais são relevantes, e a solução do problema deve elaborar os roteiros das embarcações respeitando as janelas de tempo dos clientes e dos próprios veículos. Dentro da categoria de Problemas Combinados de Roteirização e Programação de Veículos, o problema que mais se assemelha ao PTS-P é o Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Restrição de Janela de Tempo (PRPVRJT), ou “vehicle routing and scheduling problem with time windows” (VRSPTW).

O PTS-P pode ser considerado uma extensão do PRPVRJT, pois é caracterizado por uma série de restrições adicionais que não estão presentes no PRPVRJT. Dada a inexistência de algoritmos para problemas com restrições específicas, a busca de um procedimento de solução será feita a partir do estudo de algoritmos de solução propostos para o PRPVRJT. No capítulo seguinte será feita uma revisão bibliográfica de uma série de algoritmos propostos para a solução do PRPVRJT. Também serão estudados os trabalhos referentes ao

Problema de Coleta e Entrega com Restrição de Janela de Tempo (PCERJT), que é uma extensão do PRPVRJT. Se no Problema de Transporte de Suprimentos também ocorresse o transporte de suprimentos entre as unidades marítimas, então o mesmo poderia efetivamente ser classificado como um PCERJT, porém o transporte só ocorre entre a base e as unidades marítimas, não configurando relação de precedência do tipo coleta/entrega entre as unidades marítimas.

As restrições adicionais que estão presentes no Problema de Transporte de Suprimentos podem ser visualizadas seguindo-se o esquema de classificação para problemas de roteirização e programação de veículos proposto por Desrochers, Lenstra e Savelsbergh (1990). A idéia básica dos autores é que o esquema sirva de orientação na fase inicial de desenvolvimento de um sistema de roteirização, ou seja, durante a compreensão dos aspectos relevantes do problema em estudo e sua modelagem. O esquema proposto, segundo os autores, permite classificar a maioria dos modelos já considerados na literatura, servindo como ferramenta para esclarecer a grande variedade de parâmetros existentes nos problemas de roteirização e programação de veículos. Os principais parâmetros abordados nesse esquema estão agrupados em quatro categorias:

- ENDEREÇOS, referente aos parâmetros relacionados aos clientes e aos depósitos
- VEÍCULOS, referente aos parâmetros relacionados à frota
- CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA, referente aos parâmetros relacionados à rede, ao tipo de serviço, às restrições entre endereços, às restrições entre endereços e veículos, e às restrições entre veículos
- OBJETIVO, referente ao tipo de otimização que se procura obter

Segundo esse esquema, o Problema de Transporte de Suprimentos pode receber a seguinte classificação:

ENDEREÇOS

- número de depósitos: um (1)
- tipo de demanda: localizada nos nós, só entregas, demanda determinística
- restrições de programação nos endereços: múltiplas janelas de tempo
- restrições na seleção dos endereços: todos endereços com demanda devem ser visitados

VEÍCULOS

- número de veículos: variável (de acordo com as condições do problema em cada momento)
- restrições de capacidade: veículos com diferentes capacidades
- restrições de carga: veículos com compartimentos dedicados
- restrições na programação: diferentes janelas de tempo para os veículos
- restrições de duração de rota: diferentes autonomias para cada veículo

CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA

- tipo de rede: euclidiana, não direcionada
- tipo de estratégia de serviço: é permitida divisão de demanda com mais de uma visita desde que em dias diferentes, não há cargas de retorno, veículo pode fazer várias rotas consecutivas, rotas começam e terminam no depósito
- restrições entre endereços: não há restrições de precedência, não há restrições entre depósito e clientes, não há restrições entre clientes
- restrições entre endereços e veículos: entre depósito e veículos (tempos de

carregamento), entre clientes e veículos (tempos de descarga e tipo de carga que o veículo pode levar, restrição de uma unidade marítima só permitir a visita de 1 embarcação por dia

- restrições entre veículos: não existem restrições entre veículos

OBJETIVO

- minimizar soma de: custos variáveis (dependentes da duração das rotas) e custos fixos

5. Problemas de Roteirização : a necessidade de se gerar um procedimento informatizado específico

A proposição de um procedimento informatizado para um problema qualquer pode gerar a seguinte pergunta: O que se ganha nesse processo de informatização? O aumento de velocidade do processo de resolução de um problema por si só pode não ser uma boa justificativa, principalmente se o computador apenas permitir obter o resultado errado de maneira mais rápida! Para responder a essa pergunta no contexto particular de problemas de roteirização, pode-se consultar o trabalho de Sutcliffe e Board (1991). Nesse trabalho os autores analisam os benefícios gerados pela utilização de procedimentos informatizados para roteirização de veículos (somente foram analisados trabalhos teóricos publicados, dos quais apenas alguns se referiam a casos reais, com resultados efetivamente alcançados na prática).

Utilizando análise de regressão, Sutcliffe e Board tentam correlacionar o benefício atingido com as características dos problemas resolvidos. Os autores concluem que quanto mais complexo o problema (por exemplo, maior número de clientes, veículos e rotas, e a presença de janelas de tempo), maior o benefício alcançado. Como benefícios principais, os autores apontam:

- a obtenção de rotas mais curtas e mais rápidas;
- menor número de veículos empregados;
- menores custos;
- a empresa torna-se menos dependente da pessoa responsável pela roteirização (roteirista)
- aumento da produtividade do roteirizador em relação ao processo manual;
- melhoria do processo de registro das operações efetuadas;
- promoção de uma melhor compreensão do processo de roteirização;
- melhor controle da função de transporte na empresa;
- capacidade de se efetuar análises de sensibilidade;
- capacidade de se testar hipóteses (“what-if”);
- capacidade de decidir entre operar uma frota própria ou contratar frota de terceiros;
- benefícios para os motoristas (programação de horários adequados);
- benefícios para os clientes (melhor nível de serviço).

Se a informatização do procedimento de roteirização parece justificável, então se poderia simplesmente utilizar um pacote comercial de roteirização, ou apenas alterar algum algoritmo existente para contemplar a estrutura de dados particular do problema a ser resolvido. Golden, Bodin e Goodwin (1986) por outro lado analisam pacotes comerciais disponíveis para utilização em microcomputadores. Os autores concluem que os *softwares*

de roteirização podem gerar grandes economias, mas que há um grande campo a ser pesquisado, pois muitas necessidades e problemas específicos não são bem tratados pelos pacotes existentes, demandando soluções específicas (grifo nosso). Rosseau (1988), e Assad (1988) também comentam a necessidade de soluções específicas para cada tipo de problema. Assad ainda acrescenta que as empresas que desenvolvem pacotes comerciais não se interessam em oferecer procedimentos específicos para cada aplicação, por não ser comercialmente vantajoso, ou simplesmente por não dispor de recursos ou conhecimento para tanto. Essa necessidade de soluções específicas surge da grande variedade de problemas, como foi visto na classificação dos problemas de roteirização, e das características específicas de cada problema. Bodin et al. (1983) comentam a esse respeito que a maioria dos problemas de roteirização compartilham objetivos comuns (como redução de custos, redução de frota, etc.) mas que as diferentes características e hipóteses de cada problema levam a diferentes modelagens, com diferentes métodos de resolução.

Dificuldade de se resolver problemas práticos de roteirização

Segundo Bodin (1990), muitos dos problemas descritos na literatura modelam de maneira simplificada os problemas reais. Schrage (1981) cita uma série de características que ocorrem na prática, tais como janela de tempo, múltiplos tipos de carga e múltiplos tipos de veículos, que podem ser incorporadas ao se tentar uma modelagem mais realista dos problemas práticos. Bott e Ballou (1986) citam uma lista ainda mais compreensiva de restrições que ocorrem na prática.

Mas problemas de roteirização de veículos são problemas combinatórios complexos e de difícil resolução (Magnanti, 1981). Segundo Lenstra e Rinnooy Kan (1981), "... quase todos os problemas de roteirização e programação de veículos são NP-hard e portanto improváveis de serem resolvidos em tempo polinomial". Para que isso fique claro, é necessário definir o que é um problema de classe NP-hard e um problema de classe P. Um problema é dito de classe P quando se conhece um algoritmo para sua solução cuja complexidade computacional é uma função polinomial do tamanho do problema (tal algoritmo é dito polinomial). Um problema é dito de classe NP-hard quando todos os algoritmos conhecidos para sua solução são não polinomiais (Bodin et al., 1983). Como o VRP por si só é NP-hard (Lenstra e Rinnooy Kan, 1981), a incorporação de restrições para tornar o problema modelado mais próximo do problema real só vem aumentar a complexidade do modelo e de um algoritmo de solução.

Por um lado é óbvio que a modelagem matemática de um problema deve incorporar os aspectos relevantes do mesmo, tornando o modelo o mais próximo possível da realidade. Por outro lado, isso pode se tornar inútil, já que um modelo mais próximo da realidade não garantirá a existência de um procedimento que gere soluções melhores. Isso é particularmente verdadeiro para problemas de roteirização. Os problemas de roteirização encontrados na prática são em geral NP-hard (Bodin et al., 1983). Segundo Solomon e Desrosiers (1988), o VRSPTW também é NP-hard, por ser uma extensão do VRP. Em função disso, muitas vezes a aplicação de métodos de solução exata é inviável, sendo frequente a utilização de algoritmos do tipo heurístico para a resolução de problemas de roteirização mais complexos (Christofides, Mingozzi e Toth, 1979; Magnanti, 1981; Bodin et al., 1983; Golden e Assad, 1986; Solomon e Desrosiers, 1988; Haimovich, Rinnooy Kan

e Stougie, 1988; Ballou, 1989; Powers, 1989; Bodin, 1990; Cunha, 1996). Desrochers, Desrosiers e Solomon (1992) colocam ainda que enquanto os algoritmos heurísticos tem sido efetivos na resolução de uma ampla variedade de problemas de tamanho e restrições próximos da realidade, os métodos exatos têm ficado bastante atrás.

Silver, Vidal e de Werra (1980) citam uma definição de heurística proposta por Nicholson, que define uma heurística como um procedimento "... para resolver problemas de maneira intuitiva, no qual a estrutura do problema pode ser interpretada e explorada inteligentemente para obter soluções razoáveis". Ballou (1989) cita uma definição proposta por Hinkle e Keuhn, que propõe que "uma heurística ... é um processo de racionalização... que procura uma solução satisfatória ao invés de uma solução ótima. A heurística, que reduz o tempo gasto na procura da solução de um problema, compreende uma regra ou procedimento computacional que restringe o número de alternativas de solução para um problema, de maneira análoga ao processo humano de tentativa e erro utilizado para obter soluções para problemas para os quais não existem métodos exatos de solução". O fato de heurísticas quase nunca oferecerem soluções exatas não é suficiente para descartar sua utilização, particularmente para os problemas de roteirização, onde muitos dos algoritmos de solução são de natureza heurística. Segundo Ballou (1989), existem heurísticas que conseguem obter resultados muito próximos dos obtidos por métodos exatos. Na verdade, existem uma série de fatores que, se presentes no problema a ser resolvido, podem tornar recomendável a utilização de heurísticas como procedimento de solução (Zanakis e Evans, 1981; Silver, Vidal e de Werra, 1980; Ballou, 1989) :

- não se conhecem métodos exatos de solução;
- algum método exato é conhecido, mas é proibitivo do ponto de vista computacional;
- o método heurístico é mais simples e fácil de compreender em comparação com outros procedimentos, facilitando sua implementação e utilização, bem como permitindo uma melhor compreensão das variáveis e parâmetros mais importantes do problema, servindo inclusive um instrumento de aprendizado;
- os dados disponíveis são inexatos ou limitados, de modo que os erros cometidos na obtenção desses dados supera o erro causado pela não-otimalidade da heurística;
- o modelo a ser resolvido é apenas uma simplificação do problema real, não se justificando um grande esforço para se resolver de maneira exata o problema simplificado;
- necessidade de se resolver o problema continuamente, o que pode tornar vantajosa a utilização de um procedimento que tenha menor custo computacional.

6. Revisão Bibliográfica

Entre os trabalhos pesquisados na revisão bibliográfica, escolheu-se a heurística de inserção I1 de Solomon, no trabalho de Solomon (1987), como o procedimento para ser adaptado para resolução do Problema de Transporte de Suprimentos. Pelas características específicas do Problema de Transporte de Suprimentos, ressalta-se que nenhum dos algoritmos pode ser aplicado diretamente, devendo ser adaptado adequadamente. Os trabalhos revisados estão relacionados no quadro 1.

Quadro 1 - Trabalhos examinados na revisão bibliográfica

Referência	Problema	Abordagem
1. Solomon (1987)	VRSPSTW	Heurísticas de construção
2. Solomon, Baker e Schaffer (1988)	VRSPSTW	Heurística de melhoria (troca de arcos)
3. Desrochers, Desrosiers e Solomon (1992)	VRSPSTW	Método exato (geração de colunas)
4. Koskosidis, Powell e Solomon (1992)	VRSPSTW	Heurística (baseada em programação matemática)
5. Balakrishnan (1993)	VRSPSTW	Heurísticas de construção
6. Potvin e Rousseau (1993)	VRSPSTW	Heurística de construção paralela de rotas
7. Van Der Bruggen, Lenstra e Schuur (1993)	SVPDPTW	Heurística de construção e melhoria (troca de arcos)
8. Thompson e Psaraftis (1993)	VRSPSTW	Heurística de melhoria (transferência cíclica)

- As referências (2) e (8) apresentam procedimentos de melhoria. Isso significa que, em princípio, a utilização de qualquer um deles numa primeira etapa fica automaticamente descartada, pois são adequadas apenas para a melhoria de soluções iniciais. Ou seja, esses algoritmos não eliminam o primeiro passo, que é a busca inicial de uma solução viável.
- A referência (3) apresenta um método exato promissor. Por hora, o tamanho dos problemas resolvidos (25 clientes) inviabiliza a adaptação para o Problema de Transporte de Suprimentos, que além de contar com maior número de pontos de demanda incorpora uma série de restrições adicionais, que só viriam a degradar o desempenho do algoritmo.
- A referência (4) apresenta um procedimento heurístico de difícil implementação, e que para o caso de problemas com janela de tempo que não podem ser violadas não apresentou resultados superiores aos alcançados por Solomon (1987).
- A referência (5) tem como vantagem a simplicidade das heurísticas apresentadas, aplicadas a problemas de roteirização com janelas de tempo que podem ser quebradas mediante o pagamento de uma penalidade. Porém os algoritmos propostos não apresentaram resultados adequados para problemas onde não se permite a quebra de janelas de tempo.
- A referência (6) apresenta uma modificação da heurística de inserção I1 de Solomon, utilizando a mesma para gerar soluções iniciais. A modificação introduzida se refere à abertura de várias rotas simultaneamente, em número igual ao número de rotas existentes na solução gerada pela heurística I1, mas os resultados obtidos não permitem concluir se o procedimento proposto é superior à heurística I1, e também não permitem concluir a sensibilidade do algoritmo em relação à qualidade da solução inicial. Especificamente para o caso de problemas caracterizados por agrupamento de clientes, que é o caso também do Problema de Transporte de Suprimentos, obtiveram-se resultados piores que a heurística I1.
- A referência (7) apresenta um procedimento de construção e melhoria que, porém, não pode ser comparado adequadamente, já que a modelagem se restringia a somente um

veículo, e o algoritmo foi aplicado a um conjunto de problemas diverso do conjunto de problemas de Solomon (1987).

A escolha da heurística I1 de Solomon se justifica não só pelos resultados alcançados, mas também pela simplicidade do método proposto e aparente facilidade de adaptação para incorporação de restrições adicionais. Segundo Cunha (1996) as heurísticas propostas por Solomon (1987) têm sido bastante utilizadas em aplicações práticas, devidamente adaptadas para as peculiaridades de cada problema.

No próximo item será apresentado de maneira detalhada o algoritmo da heurística de inserção I1 de Solomon apresentada na referência (1), bem como o algoritmo modificado e adaptado para o PTS-P.

7. Descrição do algoritmo adaptado para resolução do PTS-P

A partir do algoritmo básico correspondente à heurística I1 de Solomon foi elaborada uma versão adaptada para a resolução do PTS-P. Na proposição do algoritmo adaptado foram consideradas simplificações e hipóteses para o PTS-P, descritas adiante.

- Os aspectos probabilísticos inerentes à operação não são considerados; dessa maneira os tempos de deslocamento das embarcações dependem apenas da velocidade da embarcação e da distância a ser percorrida, e independem das condições de mar. Também não são consideradas as filas para carga na base e descarga nas unidades marítimas.
- Os tempos de carregamento e descarregamento de uma embarcação não levarão em consideração a existência de filas. O tempo de carregamento (preparação na base) será considerado como constante, dependendo apenas do tipo de embarcação. O tempo de descarregamento em cada unidade marítima será calculado considerando a quantidade de carga a ser descarregada e as taxas de descarregamento. Para cargas de convés, a velocidade de descarregamento é um parâmetro da unidade marítima, para cargas a granel armazenadas em tanques e silos a velocidade de descarregamento é um parâmetro da embarcação.
- É permitido o descarregamento simultâneo de cargas de convés e de tanques/silos, caso estejam sendo entregues na mesma unidade marítima (as cargas de convés utilizam os equipamentos de descarga das unidades marítimas, e as cargas de tanques e silos utilizam os equipamentos de descarga da embarcação).
- O tempo de manobra para atracação das embarcações nas unidades marítimas será considerado como um parâmetro que não depende da interação entre embarcação e unidade marítima, nem depende das condições de mar, sendo considerado como um parâmetro que depende apenas da embarcação.
- Somente serão consideradas as embarcações dedicadas exclusivamente ao transporte de suprimentos.
- As embarcações terão uma data inicial de disponibilização e serão considerados períodos de indisponibilidade (para atividades de manutenção, por exemplo).
- Os tanques de diesel e água das embarcações, utilizados para transporte de carga para as

unidades marítimas, são os mesmos utilizados para consumo próprio.

- As capacidades de cada tipo de carga e a capacidade total carga de cada embarcação são parâmetros conhecidos, dependentes de cada embarcação.
- Não serão considerados aspectos relativos à estabilidade das embarcações, tanto no que se refere às combinações de carga que poderiam afetar à estabilidade, quanto no que se refere à ordem de descarregamento, que poderia causar o mesmo efeito.
- As janelas de tempo das requisições serão consideradas como sendo o período de 1 dia (24 horas), ou seja, as requisições devem ter o atendimento iniciado em qualquer momento desse dia.
- Com relação à disponibilização das cargas, admitir-se-á que cada requisição estará disponível na base numa certa data. Assim, para que uma requisição seja alocada a um roteiro ela deve estar disponível antes do instante que o veículo deixa a base para executar aquele roteiro.
- Não serão consideradas restrições relativas à precibilidade de cargas (tempo máximo em percurso).
- Todas as requisições de mesma janela de tempo (mesma data de entrega) para uma mesma unidade marítima devem ser atendidas por uma mesma embarcação (uma unidade marítima não pode receber a visita de mais de uma embarcação por dia).

Alguns dos pontos acima, mesmo representando simplificações para o Problema de Transporte de Suprimentos, ainda assim conferem à heurística adaptada uma complexidade maior que a da versão original. As principais alterações introduzidas em relação à heurística original para levar em conta esse aumento de complexidade se referem a:

- Agrupamento de requisições de mesmo dia e mesmo destino, com objetivo de evitar atendimento por mais de uma embarcação (restrição da unidade marítima receber a visita de somente uma embarcação por dia);
- Utilização de frota não homogênea, com múltiplos tipos de carga, velocidades e custos operacionais;
- Introdução de um critério de seleção da embarcação a ser utilizada. Ao se iniciar uma nova rota, será escolhida a embarcação disponível que apresentar menor custo variável unitário estimado (custo de combustível por tonelada transportada);
- Introdução de um critério de desempate no critério de inicialização 2: caso haja duas ou mais requisições com a mesma data para início de atendimento, seleciona-se a unidade marítima mais distante;
- Teste de limite de distância temporal entre o início da janela de tempo do cliente que está sendo inserido e o fim da janela de tempo do último cliente da rota ($e_u - l_m > d$ dias, $d \geq 0$) que tenta evitar inserções de requisições no fim da rota que venham a causar excesso de espera para atendimento. Assim, essas requisições nem são consideradas para a inserção nesse momento podendo, porém, ser inseridas posteriormente. Isso também permite restringir o número de requisições candidatas a cada inserção;
- Restrição múltipla de capacidade de carga, considerando as diferentes capacidades de cada tipo de carga para cada embarcação;
- Restrição dupla de autonomia (água e combustível), considerando consumos diferentes para as diversas condições de operação (navegação, manobras, carga/descarga), e considerando que os tanques de carga também são utilizados para consumo próprio;
- Restrição de data de disponibilização das requisições na base;

- Restrição de janela de tempo da embarcação (datas de disponibilização e períodos de indisponibilidade).

Os principais passos do algoritmo adaptado são descritos adiante, resumidamente. Preliminarmente, para se estimar o custo variável unitário de cada embarcação, o algoritmo será processado considerando cada embarcação isoladamente no atendimento das requisições, como se essa embarcação fosse única disponível para atendimento. Os roteiros gerados para cada embarcação isoladamente irão gerar o custo variável por tonelada efetivamente transportada, que será utilizado como critério para escolha de embarcações pelo algoritmo. No primeiro passo agrupam-se as requisições para o mesmo dia e mesma unidade marítima da requisição candidata. Em seguida, escolhe-se o veículo disponível de menor custo variável unitário estimado. A requisição a ser inserida para iniciar a rota é escolhida utilizando um dos critérios de inicialização, respeitando as restrições de:

- restrição de limite de distância temporal;
- restrição múltipla de capacidade de carga: carga de convés (área e tonelage), carga de cada tanque/silo (volume) e carga total (tonelage);
- restrição dupla de autonomia (diesel e água);
- restrição de viabilidade temporal das requisições na rota (janela de tempo);
- restrição de data de disponibilização de carga na base;
- restrição de janela de tempo da embarcação (data inicial de disponibilização e períodos de disponibilidade).

Para escolha da próxima requisição, verifica-se para cada requisição não atendida a viabilidade de inserção em todas as posições da rota, examinando-se todas as restrições mencionadas acima. Calcula-se para cada requisição u a melhor posição viável de inserção na rota já construída e o correspondente custo c_1 ; a seguir calcula-se a função c_2 para cada requisição para cada uma dessas requisições, e insere-se a requisição u^* que maximiza se a função c_2 . Essa rotina é repetida até não ser mais possível inserir nenhuma requisição na rota em construção nem abrir uma nova rota. O algoritmo APTSP fica escrito da seguinte maneira (as alterações introduzidas em relação à heurística original foram destacadas em negrito):

ALGORITMO APTSP

Rotina “Agrupamento de requisições”

agrupa requisições de mesma janela de tempo e mesma unidade marítima

Fim-Rotina

Repete enquanto houver alguma requisição não alocada

executa rotina “Agrupamento de requisições”

executa rotina “Escolha do veículo”

executa rotina “Inicialização de rota”

repete enquanto for possível inserir alguma requisição na rota em construção

executa rotina “Escolha da requisição e da posição de inserção”

insere requisição na rota em construção

fim-repete

Fim-Repete

Rotina “Escolha do veículo”

seleciona embarcação disponível com menor custo variável unitário estimado

Fim-Rotina

Rotina “Inicialização de rota”

escolhe a requisição candidata para abrir a nova rota utilizando um dos critérios
critério 1 - requisição não atendida de cliente mais distante, de maior d_{oi} (**em caso de empate, escolhe a de menor l_i**)

critério 2 - requisição não atendida com menor valor de l_i (**em caso de empate, escolhe a de maior d_{oi}**)

verifica viabilidade de inserção da requisição

executa rotina “Testes de viabilidade de inserção”

caso não seja possível, escolhe outra requisição candidata e repete o processo

fim-verifica

Fim-Rotina

Rotina “Escolha da requisição e da posição de inserção”

repete para cada requisição ainda não alocada

executa rotina “Testes de viabilidade de inserção”

calcula c_1 para cada posição viável

$$c_1(i, u, j) = \alpha_1 c_{11}(i, u, j) + \alpha_2 c_{12}(i, u, j) \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \alpha_1 \geq 0, \alpha_2 \geq 0,$$

$$\text{onde } c_{11}(i, u, j) = d_{iu} + d_{uj} - \mu d_{ij}, \quad \mu \geq 0$$

$$c_{12}(i, u, j) = b_{j/u} - b_j$$

fim-calcula

calcula melhor posição viável de inserção da requisição u

$$c_1(i(u), u, j(u)) = \min [c_1(i_{p-1}, u, i_p)]$$

fim-calcula

fim-repete

escolhe requisição u^* a ser inserida

$$c_2(i(u^*), u^*, j(u^*)) = \max [c_2(i(u), u, j(u))]$$

$$\text{onde } c_2(i, u, j) = \lambda d_{0u} - c_1(i, u, j), \quad \lambda \geq 0$$

fim-escolhe

Fim-Rotina

Rotina “Testes de viabilidade de inserção”

verifica limite de distância temporal

se $e_u - l_m > d$ dias,

$$d \geq 0$$

então não considera a inserção da requisição u na rota em construção

fim-verifica

verifica disponibilidade da requisição na base

verifica viabilidade de cada posição de inserção

repete para cada posição de inserção entre as requisições i_{p-1} e i_p da rota (i_0, \dots, i_m) em construção, com $1 \leq p \leq m$

verifica restrições de autonomia múltipla (diesel e água)

verifica restrição de capacidade do veículo

verifica se a embarcação está habilitada a levar o tipo de carga

verifica capacidade de carga de convés (tonelagem e área)

verifica capacidade de carga de cada tanque (volume)

verifica capacidade de carga total (tonelagem)

fim-verifica

verifica viabilidade temporal (janela de tempo das requisições)

verifica disponibilidade da embarcação (janela de tempo da embarcação)

fim-repete

fim-verifica

Fim-Rotina

8. Implementação Computacional do Algoritmo APTSP

O algoritmo APTSP para resolução do Problema de Transporte de Suprimentos foi implementado em linguagem Visual Basic. A plataforma utilizada foi microcomputador padrão PC, em sistema operacional Windows 95. A base de dados foi implementada em

banco de dados relacional formato MDB (Acess). O tempo de execução para o cenário em escala reduzida utilizado nos testes foi da ordem de 2 minutos para a melhor solução encontrada.

8.1. Descrição do cenário em escala reduzida utilizado para testes

Para efeitos de testes, considerou-se um cenário em escala reduzida, o mesmo apresentado originalmente por Brinati, Mesquita e Becker (1993). Desse modo além da análise de consistência do desempenho do algoritmo APTSP, será possível também comparar o desempenho do mesmo com o algoritmo ADPOFS desenvolvido por Brinati, Mesquita e Becker. O cenário do exemplo numérico é o seguinte:

- horizonte de programação de 30 dias (de 01/01/91 a 31/01/91);
- atendimento de 5 unidades marítimas (PA06, PA07, PCH01, PCH02, PA27) a partir de 1 base (Macaé);
- utilização de 4 embarcações (Astro Agulha, Astro Curimã, Astro Cação e Maersk Detector), sendo que 1 delas (Astro Curimã) não está disponível (portanto utilização efetiva de apenas 3 embarcações);
- necessidade de atendimento de 200 requisições no período de programação;
- todas as requisições com janela de tempo para início de atendimento com duração de 1 dia inteiro (das 00:00 horas de um dia às 00:00 horas do dia seguinte);
- cada requisição disponível na base com uma determinada antecedência em relação à data de início de janela de tempo de atendimento (por exemplo, todas as cargas do tipo rancho disponibilizadas com 3 dias de antecedência);
- as requisições se restringem a apenas 2 tipos de cargas de tanques/silos (água e diesel) e 3 tipos de cargas de convés (convés, rancho e tubos);
- previsão de um período de indisponibilidade para a embarcação Astro Agulha, com duração de 5 dias
- hipótese de uso especializado da embarcação Astro Cação (só pode ser utilizada para transporte de rancho);
- todas as embarcações disponíveis na base prontas para partida no dia anterior ao primeiro dia de programação, com exceção do Astro Agulha, disponível inicialmente a partir do dia 01/01/91 às 6:30 horas.

8.2. Análise dos resultados obtidos no cenário em escala reduzida

Os resultados obtidos foram comparados com o resultado obtido originalmente por Brinati, Mesquita e Becker (1993) com seu algoritmo ADPOFS, conforme relacionado na tabela 1. Essa tabela mostra para cada embarcação, o custo variável total no período (considerando-se apenas o custo de combustível), a carga total transportada, a distância total percorrida, o custo por tonelada transportada e o número total de viagens realizadas. Esses indicadores de desempenho também são relacionados para a frota, para a qual se acrescenta o número requisições não atendidas no período. O custo variável total no período foi calculado considerando os tempos de navegação, tempos de atracação e tempos de descarga nas unidades marítimas, e os correspondentes consumos de combustível de cada embarcação nessas condições de operação.

Tabela 1 - Desempenho econômico-operacional das embarcações da frota de acordo com o algoritmo ADPOFS de Brinati, Mesquita e Becker, para o cenário em escala reduzida

Parâmetro	Unidade	Astro Agulha	Astro Cação	Maersk Detector	Frota
Custo variável total no período	US\$	24.677,57	4.683,98	48.052,15	77.413,70
Carga total transportada	ton	2903,00	84,00	6671,00	9658,00
Distância total percorrida	milhas	1661,40	693,96	1831,02	4186,38
Custo variável por tonelada	US\$/ton	8,50	55,76	7,20	8,01
Número de viagens realizadas	unid	10	5	10	25
Requisições não atendidas	unid	-	-	-	8

Análise paramétrica

O algoritmo APTSP foi executado variando-se os parâmetros $(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2)$, os critérios de inicialização e o critério de limite de distância temporal. Foram utilizados os valores $\mu = (0 \text{ ou } 1)$, $\lambda = (0 \text{ ou } 1)$, $\alpha_1 = (0 \text{ ou } 1)$, $\alpha_2 = (0 \text{ ou } 1)$. O algoritmo foi processado com essas combinações de parâmetros, com critério de limite de distância temporal d igual a 1,5 ou 4 dias, para o critério de inicialização 1, e d igual a 1,0 ; 1,5 ; 2,0 ou 4,0 dias para o critério de inicialização 2. Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 2 a 7 a seguir.

Tabela 2 – Resultados com critério de inicialização 1, critério de limite de distância temporal $d = 1,5$ dias, variando os parâmetros $\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2$

Parâmetros	Número de requisições não atendidas	Número de viagens realizadas	Custo variável por tonelada para toda a frota (US\$/ton)
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 1, 0)$	57	15	12,68
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 1, 0)$	57	15	12,68
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 1, 0)$	42	17	11,60
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 1, 0)$	51	15	12,25
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 0, 1)$	4	31	8,11
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 0, 1)$	4	31	8,01
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 0, 1)$	4	31	8,11
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 0, 1)$	4	31	8,01

Tabela 3 – Resultados com critério de inicialização 1, critério de limite de distância temporal $d = 4,0$ dias, variando os parâmetros $\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2$

Parâmetros	Número de requisições não atendidas	Número de viagens realizadas	Custo variável por tonelada para toda a frota (US\$/ton)
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 1, 0)$	73	13	13,74
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 1, 0)$	73	13	13,74
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 1, 0)$	75	13	14,69
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 1, 0)$	75	13	14,69
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 0, 1)$	18	19	9,02
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 0, 1)$	14	20	8,97
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 0, 1)$	18	19	9,02
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 0, 1)$	14	20	8,97

Tabela 4 – Resultados com critério de inicialização 2, critério de limite de distância temporal $d = 1,0$ dias, variando os parâmetros $\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2$

Parâmetros	Número de requisições não atendidas	Número de viagens realizadas	Custo variável por tonelada para toda a frota (US\$/ton)
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 1, 0)$	78	16	13,76
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 1, 0)$	78	16	13,76
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 1, 0)$	40	17	11,18
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 1, 0)$	41	18	11,19
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 0, 1)$	6	36	8,15
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 0, 1)$	6	36	8,08
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 0, 1)$	6	36	8,15
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 0, 1)$	6	36	8,08

Tabela 5 – Resultados com critério de inicialização 2, critério de limite de distância temporal $d = 1,5$ dias, variando os parâmetros $\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2$

Parâmetros	Número de requisições não atendidas	Número de viagens realizadas	Custo variável por tonelada para toda a frota (US\$/ton)
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 1, 0)$	66	15	12,33
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 1, 0)$	66	15	12,33
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 1, 0)$	59	16	12,88
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 1, 0)$	38	17	10,88
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 0, 1)$	4	31	8,11
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 0, 1)$	4	31	8,01
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 0, 1)$	4	31	8,11
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 0, 1)$	4	31	8,01

Tabela 6 – Resultados com critério de inicialização 2, critério de limite de distância temporal $d = 2,0$ dias, variando os parâmetros $\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2$

Parâmetros	Número de requisições não atendidas	Número de viagens realizadas	Custo variável por tonelada para toda a frota (US\$/ton)
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 1, 0)$	66	14	12,29
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 1, 0)$	66	14	12,29
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 1, 0)$	55	13	12,03
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 1, 0)$	45	15	11,16
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 0, 1)$	11	21	8,51
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 0, 1)$	7	22	8,39
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 0, 1)$	11	21	8,51
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 0, 1)$	7	22	8,39

Tabela 7 – Resultados com critério de inicialização 2, critério de limite de distância temporal $d = 4,0$ dias, variando os parâmetros $\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2$

Parâmetros	Número de requisições não atendidas	Número de viagens realizadas	Custo variável por tonelada para toda a frota (US\$/ton)
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 1, 0)$	72	12	13,65
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 1, 0)$	69	13	13,42
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 1, 0)$	75	13	14,69
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 1, 0)$	75	13	14,69
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 0, 1)$	18	19	9,02
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 0, 1)$	14	20	8,97
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 0, 1)$	18	19	9,02
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 0, 1)$	14	20	8,97

Efeito dos parâmetros α_1 e α_2

Os parâmetros α_1 e α_2 ponderam respectivamente o acréscimo de distância e o acréscimo de tempo na função de custo c_1 em cada inserção. Nas tabelas 2 a 7 verifica-se que para mantidos iguais os outros parâmetros do algoritmo, quando $(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 1)$ os resultados são bem melhores do que quando $(\alpha_1, \alpha_2) = (1, 0)$. Ou seja, quando apenas o acréscimo de tempo é considerado os resultados são bem melhores do que quando apenas o aspecto de acréscimo de distância é considerado, mantidos inalterados os outros parâmetros.

Esses resultados corroboram os resultados originais para a heurística I1 relatados por Solomon (1987), que conclui que as soluções com $(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 1)$ apresentaram melhores resultados do que aqueles com $(\alpha_1, \alpha_2) = (1, 0)$, principalmente em problemas com grande número de clientes alocados por veículo (que não é o caso do Problema de Transporte de Suprimentos) e/ou alta densidade de clientes com janela de tempo (que é o caso do Problema de Transporte de Suprimentos, com 100% de clientes com janela de tempo). Quando $\alpha_2 = 0$ o algoritmo gera rotas com maior proporção de tempos de espera, demonstrando incapacidade de lidar adequadamente com os aspectos temporais do problema. A tabela 8 detalha o efeito dos parâmetros α_1 e α_2 . Manteve-se constante o critério de inicialização 2, o valor de limite de distância temporal $d = 1,5$ dias e o valor do parâmetro $\mu = 1$, combinação que gerou melhores resultados. Aproveitou-se para variar o parâmetro λ , utilizando-se os valores $\lambda = 1, 2$ ou 3 .

A melhor solução foi obtida com $(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,9, 0,1)$, conforme destacado na tabela 8. Esses valores serão utilizados no detalhamento do efeito do limite de distância temporal d feita adiante. Esses resultados mostram a robustez do algoritmo. Para o critério de inicialização 2, critério de distância temporal = 1,5 dias, $\mu = 1, \lambda = 2, \alpha_1 > 0$ e $\alpha_2 > 0$, foram sempre obtidos melhores resultados que os do algoritmo ADPOFS, com redução de custo e redução do número de requisições não atendidas. Isso sugere que na utilização do algoritmo APTSP para resolução de um problema real não é necessário testar várias combinações dos parâmetros para cada programação a ser executada. Basta apenas realizar uma calibragem inicial do algoritmo para um dado cenário, determinando o critério de

inicialização e os valores de μ e de λ . Para realizar a programação, basta variar os valores de α_1 , α_2 e d ao se executar o algoritmo, escolhendo-se a melhor solução obtida.

Tabela 8 – Resultados com critério de inicialização 2, critério de limite de distância temporal $d = 1,5$ dias, $\mu = 1$, variando os parâmetros λ , α_1 , α_2

Parâmetros	Número de requisições não atendidas	Número de viagens realizadas	Custo variável por tonelada para toda a frota (US\$/ton)
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 0,9, 0,1)$	4	31	7,94
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,9, 0,1)$	4	31	7,79
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 3, 0,9, 0,1)$	8	30	8,19
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 0,8, 0,2)$	4	31	7,83
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,8, 0,2)$	4	31	7,83
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 3, 0,8, 0,2)$	4	30	8,06
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 0,5, 0,5)$	4	31	7,86
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,5, 0,5)$	4	31	7,88
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 3, 0,5, 0,5)$	4	31	7,92
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 0,2, 0,8)$	4	31	7,92
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,2, 0,8)$	4	31	7,87
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 3, 0,2, 0,8)$	4	31	7,92
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 0,1, 0,9)$	4	31	8,01
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,1, 0,9)$	4	31	7,96
$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 3, 0,1, 0,9)$	4	31	7,93

Efeito do critério de inicialização de rotas

O critério de inicialização 2, que escolhe como primeiro cliente aquele cuja janela de tempo vence primeiro e que, portanto, prioriza o aspecto temporal para a inicialização da rota, proporcionou melhores resultados. Isso pode ser verificado comparando-se os resultados da tabela 2 com os da tabela 5 e os da tabela 3 com os da tabela 7. Essa comparação está resumida na tabela 9.

Tabela 9 – Comparação entre os critérios de inicialização 1 e 2

Parâmetros	Melhor critério de inicialização
$d = 1,5$ dias, $(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 1)$	critério 1 e 2 se equivalem
$d = 1,5$ dias, $(\alpha_1, \alpha_2) = (1, 0)$	critério 2
$d = 4,0$ dias, $(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 1)$	critério 1 e 2 se equivalem
$d = 4,0$ dias, $(\alpha_1, \alpha_2) = (1, 0)$	critério 2

Quando $(\alpha_1, \alpha_2) = (1, 0)$, o critério de inicialização 2 gera soluções melhores que o critério 1 (porém ambas sempre piores do que quando $(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 1)$), o que pode ser creditado à priorização do aspecto temporal na abertura de rotas que serão construídas levando em conta apenas aspectos espaciais a partir da 2ª requisição inserida. Quando $(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 1)$, os critérios de inicialização 1 e 2 se equivalem. Aparentemente, uma

possível decisão errada na escolha da 1ª requisição pelo critério 1 é revertida pelo desempenho superior com os parâmetros $(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 1)$, porém os testes realizados não permitem concluir esse aspecto de modo decisivo.

Efeito do critério de limite de distância temporal d

O critério de limite de distância temporal (d) tem como objetivo restringir o número de requisições candidatas à inserção a cada momento durante a construção de uma rota, diminuindo o tempo de processamento. Evita também que se insira no fim da rota uma requisição que esteja distante temporalmente, o que pode piorar a qualidade da solução.

Os melhores resultados foram obtidos para d entre 1 e 2 dias. Para entender esse efeito, considere que a ordem de grandeza do tempo de ida e volta da base para uma unidade marítima é de cerca de 11 a 15 horas para o Astro Cação e Astro Agulha, e de 9,2 a 12,5 horas para o Maersk Detector. Considere também que o tempo de preparação na base é de 12 horas para o Astro Cação, 18 horas para o Astro Agulha e 24 horas para o Maersk Detector. Assim o tempo total de ida e volta mais a preparação na base é da ordem de 0,95 a 1,04 dias (23 a 25 horas) para o Astro Cação, 1,20 a 1,29 dias (29 a 31 horas) para o Astro Agulha e 1,38 a 1,52 dias (33,2 a 36,5 horas) para o Maersk Detector.

A cada momento, durante a construção da rota, as restrições a serem analisadas são restringidas pelo valor de d . Por exemplo, quando d fica próximo de 1 restringe-se o problema, já que somente serão consideradas requisições próxima no tempo, e o algoritmo fica míope, perdendo a capacidade de enxergar adiante. Para valores de d maiores, têm-se um efeito inverso, pois o algoritmo estará olhando "muito longe" no tempo, eventualmente inserindo uma requisição distante no tempo para aproveitar a capacidade residual da embarcação (que não pode ser utilizada para requisições anteriores que demandariam maior espaço ou causariam alguma quebra de restrição), o que causará aumento no tempo de espera. Ou seja, nem sempre lotar a embarcação leva a uma melhor solução.

Para d da ordem de 1,5 dias consegue-se uma ponderação entre esses efeitos. Isso faz sentido, pois é como se, a cada momento, ao se decidir pela inserção de uma nova requisição fosse necessário decidir entre voltar para a base, gerando um acréscimo de tempo da ordem de 1,0 a 1,5 dias (dependendo da embarcação) considerando os tempos de ida/volta/preparação na base, ou inserir a requisição na rota. Se essa requisição gerar um tempo de espera de mais de 1,5 dias, provavelmente a volta para a base e inserção da requisição em uma nova rota geraria uma solução melhor, com menor número de requisições não atendidas e menor custo.

Nas tabelas 2 a 7 percebe-se claramente que, conforme d aumenta, ocorre uma diminuição no número de viagens (que se tornam mais longas e com maiores tempos de espera). O número de requisições não atendidas também cresce, assim como o custo por tonelada. A tabela 10 detalha o efeito do critério de limite de distância temporal, variando-se o valor de d , e mantendo-se constantes o critério de inicialização 2 e os valores dos parâmetros $(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,9, 0,1)$, que geraram a melhor solução até então.

Tabela 10 – Resultados com critério de inicialização 2, valores dos parâmetros $(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,9, 0,1)$, variando-se o limite de distância temporal d

Parâmetros	Número de requisições não atendidas	Número de viagens realizadas	Custo variável por tonelada para toda a frota (US\$/ton)
$d = 1,0$	6	36	8,04
$d = 1,2$	0	35	7,84
$d = 1,3$	0	35	7,84
$d = 1,4$	7	29	7,50
$d = 1,5$	4	31	7,79
$d = 1,6$	4	32	8,17
$d = 1,7$	15	21	8,06
$d = 2,0$	23	21	8,40
$d = 4,0$	25	17	8,55

Com o valor de $d = 1,2$ ou $1,3$ dias conseguiu-se melhorar a solução obtida, com atendimento de todas as requisições. Essa solução será detalhada adiante.

Detalhamento da melhor solução alcançada para o cenário em escala reduzida

A melhor solução foi alcançada com o critério de inicialização 2, com os valores dos parâmetros $(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,9, 0,1)$ e critério de limite de distância temporal $d = 1,2$ ou $1,3$ dias. Considerou-se como melhor solução aquela que permitiu atender o maior número de requisições com o menor custo variável por tonelada transportada para a frota como um todo.

Tabela 11 - Desempenho econômico-operacional da frota de acordo com o algoritmo APTSP para o cenário em escala reduzida. Critério de inicialização 2, $d = 1,3$ dias, $(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,9, 0,1)$

Parâmetro	Unidade	Astro Agulha	Astro Cação	Maersk Detector	Frota
Custo variável total no período	US\$	25.914,92	8.357,77	46.235,45	80.508,14
Carga total transportada	ton	3718,00	132,00	6418,00	10268,00
Distância total percorrida	milhas	1943,25	1461,28	2094,32	5498,85
Custo variável por tonelada	US\$/ton	6,97	63,32	7,20	7,84
Número de viagens realizadas	unid	12	11	12	35
Requisições não atendidas	unid	-	-	-	0

Comparando o desempenho do algoritmo APTSP com o algoritmo ADPOFS, obteve-se um aumento na quantidade de requisições atendidas, **de 96% para 100%**, simultaneamente obtendo uma redução de custo variável por tonelada transportada de **2,12 %**. Para um nível de serviço próximo ao do obtido com o algoritmo ADPOFS, com **96,5%** de requisições atendidas, a redução de custo variável por tonelada transportada obtida com o algoritmo APTSP foi de **6,36%** (vide tabela 10, com $d = 1,4$ dias).

Considerações sobre a importância de um algoritmo parametrizável / Utilização do algoritmo APTSP para dimensionamento da frota

É interessante destacar que o algoritmo APTSP foi implementado de maneira a se poder variar os parâmetros utilizados de modo bastante simples, por meio de edição das telas de entrada do programa. Esse é um recurso bastante importante para *softwares* de roteirização, que devem ter uma interface amigável com o usuário, que permita interação e aprendizado. Segundo Ball e Magazine (1981), a interação homem e computador parece ser essencial no desenvolvimento de um algoritmo plenamente utilizável, e o papel de cada um ainda está por ser definido.

Waters (1990) comenta que "... é reconhecido que *softwares* bem desenvolvidos permitem que o ser humano desempenhe um papel importante... de modo que sua habilidade leve a melhorias ou permita transformar soluções inaceitáveis em soluções utilizáveis na prática". O trabalho de Potvin, Lapalme e Rousseau (1990), por exemplo, aborda o desenvolvimento de um sistema especialista para roteirização no qual a interação com o usuário desempenha papel fundamental.

Em função desses conceitos, o algoritmo foi implementado de modo a facilitar a alteração dos diversos parâmetros com objetivo de se testar hipóteses. Por exemplo, pode-se facilmente alterar:

- os parâmetros μ , λ , α_1 , α_2
- o critério de inicialização de rotas
- o parâmetro para conversão de tempo em distância
- o número de dias para critério de limite de distância temporal
- inclusão de novas embarcações
- os parâmetros de cada embarcação (capacidade de carga, velocidade, tipo de carga que a embarcação pode transportar, etc.)
- permitir ou não que a unidade marítima receba a visita de mais de uma embarcação no mesmo dia

Para se verificar na prática a importância desse tipo de recurso, analisou-se o exemplo numérico em questão com o objetivo de se inferir uma possível intervenção que pudesse melhorar a solução obtida. A análise da solução obtida, em particular das rotas formadas, das cargas transportadas em cada viagem, das janelas de tempo e do desempenho operacional de cada embarcação, permitiu identificar que pelo fato da embarcação Astro Cação ser uma embarcação especialista no transporte de carga tipo rancho, e as outras duas (Astro Agulha e Maersk Detector) poderem transportar qualquer tipo de carga, isso poderia estar comprometendo a qualidade da solução. É fácil verificar que a embarcação Astro Cação trabalhou com grande ociosidade, mesmo quando todas as requisições foram atendidas.

Para testar essa hipótese, as embarcações Astro Agulha e Maersk Detector foram proibidas de transportar carga tipo rancho, podendo, porém, continuar transportando qualquer outro tipo de carga. Porém, isso não permitiu melhores resultados, pois surge novamente o problema do atendimento do grupo de requisições: qualquer grupo constituído por 1

requisição de carga tipo rancho e outras de tipo diverso não poderia ser atendido, já que nenhuma embarcação pode levar simultaneamente uma carga tipo rancho e outra carga que não seja tipo rancho nesse novo cenário.

Para superar essa limitação, a rotina de agrupamento de requisições foi alterada, mantendo todas as requisições de rancho como requisições individuais, agrupando somente as requisições de cargas tipo diesel, água, convés e tubos. Tal alteração corresponde a relaxar a restrição da unidade marítima receber a visita de apenas uma embarcação no mesmo dia, pois será permitida uma visita para atendimento de rancho e outra para atendimento das demais cargas em conjunto. A tabela 12 apresenta os resultados obtidos nesse novo cenário.

Nesse novo cenário, obteve-se uma redução de custo variável por tonelada transportada de **5,41%** para a embarcação Maersk Detector, de **10,04%** para o Astro Agulha e de **10,66%** para o Astro Cação, o que é um indicador que os roteiros dessas embarcações foram melhores. Por outro lado, o desempenho da frota como um todo piorou, com um aumento de 4,84% no custo variável por tonelada transportada, o que se explica pela maior utilização do Astro Cação, que tem custo operacional muito maior. É o mesmo efeito que ocorre no transporte urbano quando se utilizam veículos de pequeno porte (kombi, furgão) quando poderia-se utilizar veículos maiores (trucks e carretas, por exemplo). Para melhorar o desempenho da frota não basta, portanto, apenas melhorar o desempenho individual de cada embarcação, mas sim escolher as embarcações mais adequadas e utilizá-las de maneira mais eficiente.

Tabela 12 - Desempenho econômico-operacional da frota de acordo com o algoritmo APTSP para o cenário em escala reduzida, considerando a proibição das embarcações Astro Agulha e Maersk Detector transportarem carga tipo rancho, e eliminando a restrição de visitas às unidades marítimas
Critério de inicialização 2, $d = 1,3$ dias, $(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,9, 0,1)$

Parâmetro	Unidade	Astro Agulha	Astro Cação	Maersk Detector	Frota
Custo variável total no período	US\$	22.609,97	18.666,98	43.107,33	84.384,29
Carga total transportada	ton	3607,00	330,00	6331,00	10268,00
Distância total percorrida	milhas	1720,08	3131,93	1934,08	6786,06
Custo variável por tonelada	US\$/ton	6,27	56,57	6,81	8,22
Número de viagens realizadas	unid	12	22	12	46
Requisições não atendidas	unid	-	-	-	0

Esse raciocínio poderia ser estendido no caso de dimensionamento da frota, quando se busca determinar a quantidade adequada de embarcações para um dado cenário, escolhendo aquelas embarcações que melhor se adaptam ao perfil de pedidos (tipos de carga, perfil de demanda por unidade marítima, janelas de tempo) e a distribuição geográfica dos clientes. Apesar do algoritmo APTSP não ter sido desenvolvido com o objetivo de dimensionar a frota, o mesmo pode ser utilizado como um sistema de simulação, testando várias hipóteses de perfil de frota e verificando a que mostra melhor desempenho.

8.3. Testes do algoritmo APTSP num cenário em escala semi-real

O algoritmo ADPOFS desenvolvido por Brinati, Mesquita e Becker (1993) foi testado com sucesso, segundo os autores, em cenários grandes, envolvendo 40 unidades marítimas, 60 embarcações e 2400 requisições para um período de 4 meses. Para verificar a mesma aplicabilidade do algoritmo APTSP realizou-se um teste piloto num cenário em escala semi-real envolvendo 30 unidades marítimas, 8 embarcações, 900 requisições com dois tipos de carga de tanques/silos (água e diesel) e um tipo de carga de convés (somente convés), para um período de 30 dias. Para esse cenário, o tempo de processamento foi de cerca de 2 horas e 10 minutos. Esse resultado mostra a aplicabilidade prática do algoritmo em problemas próximos da escala do problema real. O tempo de processamento foi um pouco elevado, podendo porém ser reduzido com a introdução adequada de um novo critério para limitar as requisições candidatas à inserção, semelhante ao critério de limite de distância temporal. Esse critério poderia ser, por exemplo, um agrupamento prévio das requisições para posterior roteirização.

9. Considerações Finais

A implementação computacional do algoritmo APTSP se mostrou satisfatória para o cenário em escala reduzida, e também para o cenário em escala semi-real. Do ponto de vista de qualidade da solução, o desempenho do algoritmo APTSP foi comparado com o do algoritmo ADPOFS anteriormente proposto por Brinati, Mesquita e Becker (1993), tendo sido possível melhorar a solução para o cenário em escala reduzida testado. A análise paramétrica efetuada mostrou que os resultados obtidos forma bastante consistentes, e mostrou também a robustez do algoritmo. Na implementação do algoritmo foi dada ênfase no desenvolvimento de uma interface amigável, com várias telas de entrada de dados e com vários parâmetros facilmente alteráveis pelo usuário. Foi ressaltada a importância teórica desse aspecto, demonstrada por um exemplo prático.

Como próximo passo nessa linha de pesquisa, sugere-se tentar melhorar o desempenho do algoritmo APTSP testando-se novas funções de custo, incluindo aspectos relativos à plena lotação das embarcações (priorizar pedidos que completem a embarcação numa rota), e aspectos relativos ao tempo de espera total da rota. O critério de limite de distância temporal também poderia ser refinado, com um valor de distância temporal d diferente para cada embarcação.

Sugere-se também o desenvolvimento de uma estratégia de solução baseada numa heurística de varredura com orientação temporal, do tipo da heurística originalmente desenvolvida por Gillet e Miller (1974) e adaptada para problemas com restrição de janela de tempo por Solomon (1987). A adaptação feita por Solomon utilizou a heurística original de varredura de Gillet e Miller para o primeiro estágio de agrupamento, utilizando a seguir a heurística I1 para roteirização. O algoritmo APTSP incorpora, de certo modo, esse conceito. O critério de limite de distância temporal atua como um critério de agrupamento por proximidade temporal (e não espacial), com roteirização utilizando a heurística I1. Não é exatamente uma estratégia de agrupamento e roteirização porque a cada inserção o grupo formado muda dinamicamente. De qualquer modo, essa é uma estratégia a ser testada, e

que deve atingir bons resultados porque na distribuição espacial dos pontos de demanda nos campos de petróleo há agrupamentos naturais, em função da existência de vários pontos de perfuração e prospecção (unidades marítimas) concentrados em cada campo de petróleo. Essa estratégia deve também permitir reduzir o tempo de processamento na resolução de um problema em escala real.

Independente do procedimento de solução a ser desenvolvido, o mesmo pode ser complementado pelo desenvolvimento de um procedimento de melhoria baseado na heurística de melhoria Thompson e Psaraftis (1993). Esse procedimento foi aplicado ao conjunto de problemas proposto por Solomon (1987), partindo das soluções iniciais geradas pela heurística I1 de Solomon, tendo se mostrado bastante promissor.

Um outro aspecto bastante interessante a ser desenvolvido é a interação entre um programa de simulação e um roteirizador, como por exemplo nos trabalhos de Botter, Souza e Borges (1996) e Borges (1998). O roteirizador pode ser inserido no programa de simulação, configurando uma metodologia de solução híbrida heurística/simulador (Bowersox e Closs, 1989). Isso poderia facilitar a visualização das soluções obtidas, proporcionando uma melhor compreensão do problema nos seus aspectos de estrutura espacial, estrutura temporal, restrições envolvidas e estrutura das soluções geradas. O programa de simulação também permite incluir alguns dos aspectos aleatórios do problema e analisar a influência dos mesmos na qualidade da solução obtida. Esse é um aspecto bastante importante, já que os impactos dos fatores aleatórios no problema podem definir se uma estratégia de solução baseada em simulação é mais adequada (Bowersox e Closs, 1989).

Referências

ASSAD, A. "Modeling and implementation issues in vehicle routing". In GOLDEN, B.; ASSAD, A. (eds), "Vehicle Routing : Methods and Studies". North-Holland, Amsterdam, p.7-45, 1988.

BALAKRISHNAN, N. "Simple heuristics for the vehicle routing problem with soft time windows". Journal of the Operational Research Society, v.44, n.3, p. 279-287, 1993.

BALL, M. ; MAGAZINE, M. "The design and analysis of heuristics". Networks, v.11, n.2, p.215-219, 1981.

BALLOU, R. H. "Heuristics: Rules of thumb for logistics decision making". Journal of Business Logistics, v.10, n.1, p.122-132, 1989.

BODIN, L.; GOLDEN, B. "Classification in vehicle routing and scheduling". Networks, v.11, n.2, p.97-108, 1981.

BODIN, L. ; GOLDEN, B.L. ; ASSAD, A. , BALL, M. "Routing and scheduling of vehicles and crews : The state of the art". Computers and Operations Research, v.10, n.2, 1983

BODIN, L. D. "Twenty years of routing and scheduling". Operations Research, v.38, n.4, p.571-579, 1990.

BRINATI, M. A. ; BOTTER, R. C. ; ROQUE, J. R. R. ; GOUVEA, M. T. ; SOUZA, R. L.; CARNEIRO, P. B. R. "Aplicação de heurísticas de roteamento para o dimensionamento de uma frota de transporte marítimo". Anais EPUSP, Série Cadernos de Engenharia Naval e Oceânica, São Paulo, v.1, p.141-155, 1991.

BRINATI, M. A. ; MESQUITA, M. A. ; BECKER, R. "Dimensionamento e programação do transporte de suprimentos para unidades marítimas de petróleo". 13º Congresso Panamericano de Engenharia Naval, Transporte Marítimo e Engenharia Portuária, Caracas, 1993.

BORGES, M. J. A. "Modelagem de um sistema de transporte marítimo de suprimentos: aplicação à Baía de

Campos”. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em engenharia - Departamento de Engenharia Naval, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

BOTT, K. ; BALLOU, R. H. “Research perspectives in vehicle routing and scheduling”. Transportation Research, v.20A, n.3, p.239-243, 1986.

BOTTER, R. C. ; SOUZA, R. L. ; BORGES, M. J. A. “Simulação de um sistema de transporte offshore de suprimentos para a baía de Campos”. 16º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval, Rio de Janeiro, 1996. Anais SOBENA, Rio de Janeiro, 1996.

BOWERSOX, D. J. ; CLOSS, D. J. “Simulation in logistics: A review of present practice and a look to the future”. Journal of Business Logistics, v.10, n.1, p133-148, 1989.

CHRISTOFIDES, N. ; MINGOZZI, A. ; TOTH, P. “The vehicle routing problem”. In CHRISTOFIDES, N. ; MINGOZZI, A. ; TOTH, P. ; SANDI, C. (eds), “Combinatorial optimizations”. John Wiley & Sons, New York, p. 315-337, 1979.

CUNHA, C. B. “Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais”. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.

DESROCHERS, M. ; LENSTRA, J. K. ; SAVELSBERGH, M. W. P. “A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems”. European Journal of Operational Research, v.46, n.3, p.322-332, 1990.

DESROCHERS, M. ; DESROSIERS, J. ; SOLOMON, M. “A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows”. Operations Research, v.40, n.2, p.342-354, 1992.

GILLET, B. ; MILLER, L. “A heuristic algorithm for the vehicle dispatching problem”. Operations Research, v.22, n.2, p.340-349, 1974.

GOLDEN, B. ; BALL, M. ; BODIN, L. “Current and future research directions in network optimization”. Computers and Operations Research, v.8, n.2, p. 71-81, 1981.

GOLDEN, B. L. ; ASSAD, A. A. “Perspectives on vehicle routing : exciting new developments”. Operations Research, v.34, n.5, p.803-810, 1986.

GOLDEN, B. L. ; BODIN, L. ; GOODWIN, T. “Microcomputer-based vehicle routing and scheduling software”. Computers and Operations Research, v.13, n.2/3, p.277-285, 1986.

HAIMOVICH, M. ; RINNOOY KAN, A. H. G. ; STOUGIE, L. “Analysis of heuristics for vehicle routing problems”. In GOLDEN, B. ; ASSAD, A. (eds), “Vehicle Routing : Methods and Studies”. North-Holland, Amsterdam, p.47-61, 1988.

JAW, J. J. ; ODONI, A. R. ; PSARAFTIS, H. N. ; WILSON, N. H. M. “A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows”. Transportation Research, v.20B, n.3, p.243-257, 1986.

KOSKOSIDIS, Y. A. ; POWELL, W. B. ; SOLOMON, M. M. “An optimization-based heuristic for vehicle routing and scheduling with soft time windows constraints”.

Transportation Science, v.26, n.2, p.69-85, 1992.

LENSTRA, J. ; RINNOOY KAN, A. “Complexity of vehicle routing and scheduling problems”. Networks, v.11, n.2, p.221-227, 1981.

MAGNANTI, T. “Combinatorial optimization and vehicle fleet planning: perspectives and prospects”. Networks, v.11, n.2, p.179-213, 1981.

POTVIN, J-Y ; LAPALME, G. ; ROUSSEAU, J-M. “Integration of AI and OR techniques for computer-aided algorithmic design in the vehicle routing domain”. Journal of the Operational Research Society, v.41, n.6, p. 517-525, 1990.

POTVIN, J-Y.; ROUSSEAU, J-M. “Parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows”. European Journal of Operational Research, v.66, n.3, p.331-340, 1993.

POWERS, R. F. “Optimization models for logistics decisions”. Journal of Business Logistics, v.10, n.1,

p106-121, 1989.

RONEN, D. "Perspectives on practical aspects of truck routing and scheduling". European Journal of Operational Research, v.35, n.2, p.137-145, 1988.

RONEN, D. "Ship scheduling : The last decade". European Journal of Operational Research, v.71, p.325-333, 1993.

SCHRAGE, L. "Formulation and structure of more complex/realistic routing and scheduling problems". Networks, v.11, n.2, p.229-232, 1981.

SILVER, E. ; VIDAL, R. ; DE WERRA, D. "A tutorial on heuristics methods". European Journal of Operational Research, v.5, p.153-162, 1980.

SOLOMON, M. "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints". Operations Research, v.35, n.2, p.254-265, 1987.

SOLOMON, M. M. ; BAKER, E. K. ; SCHAFFER, J. R. "Vehicle routing and scheduling problems with time windows constraints : efficient implementations of solution improvement procedures". In GOLDEN, B.; ASSAD, A. (eds), "Vehicle Routing : Methods and Studies". North-Holland, Amsterdam, p.85-105, 1988.

SOLOMON, M. M. ; DESROSIERS, J. "Time window constrained routing and scheduling problems". Transportation Science, v.22, n.1, p.1-13, 1988.

SUTCLIFFE, C. ; BOARD, J. "The ex-ante benefits of solving vehicle-routing problems". Journal of the Operational Research Society, v.42, n.2, p. 135-143, 1991.

THOMPSON, P. M. ; PSARAFTIS, H. N. "Cyclic transfer for the multivehicle routing and scheduling problems". Operations Research, v.41, n.5, p.935-946, 1993.

VAN DER BRUGGEN, L. J. J. ; LENSTRA, J. K. ; SCHUUR, P. C. "Variable-depth search for the single-vehicle pickup and delivery problem with time windows". Transportation Science, v.27, n.3, p.298-311, 1993.

WATERS, C. D. J. "Expert systems for vehicle scheduling". Journal of the Operational Research Society, v.41, n.6, p. 505-515, 1990.

ZANAKIS, S. H. ; EVANS, J. R. "Heuristic 'optimization': why, when and how to use it". Interfaces, v.11, n.5, p.84-91, 1981.

XIX COPINAVAL - 2005

Algoritmo para Resolução do
Problema de Programação do Transporte de
Suprimentos para Unidades Marítimas de
Exploração de Petróleo

Sérgio R. C. Brejon
Prof. Dr. Marco A. Brinati

sergiobrejon@uol.com.br, Tel 55-11- 9102-1466
mabrinat@usp.br

Problema de Transporte de Suprimentos

Descrição do Problema

- Garantir o transporte de suprimentos para unidades marítimas de exploração de petróleo
 - Relevância do Problema
 - É um problema de ocorrência restrita e pouco estudado
 - Estudos anteriores
 - Literatura disponível quase inexistente
 - ADPOFS - algoritmo específico para esse problema
-

Problema de Transporte de Suprimentos

Descrição do Problema

- Entidades envolvidas
Embarcações, Base, Cargas, Plataformas, Requisições
 - Restrições
Plataformas tem capacidade de armazenagem restrita => suprimento contínuo
 - Demanda sempre deve ser atendida, por motivos econômicos e de segurança
 - Existência de janelas de tempo para as entregas
 - Frota não é homogênea (embarcações tem características próprias de autonomia, velocidade, capacidade de carga (tipo e quantidade), tempos de carga e descarga, períodos de disponibilidade)
-

Classificação do Problema de Transporte de Suprimentos

Esquema de classificação proposto por Desrochers, Lenstra e Savelsbergh (1990)

ENDEREÇOS

- número de depósitos: um (1)
 - tipo de demanda
 - . localizada nos nós
 - . só entregas
 - . demanda determinística
 - restrições de programação nos endereços
 - . múltiplas janelas de tempo
 - restrições na seleção dos endereços
 - . todos endereços com demanda devem ser visitados
-

Classificação do Problema de Transporte de Suprimentos

VEÍCULOS

- número de veículos
 - . variável (especificado de acordo com as condições do problema em cada momento)
 - restrições de capacidade
 - . veículos com diferentes capacidades
 - restrições de carga
 - . veículos com compartimentos dedicados
 - restrições na programação
 - . diferentes janelas de tempo para os veículos
 - restrições de duração de rota
 - . diferentes autonomias para cada veículo
 - restrições de programação nos endereços
 - . múltiplas janelas de tempo
 - restrições na seleção dos endereços
 - . todos endereços com demanda devem ser visitados
-

Classificação do Problema de Transporte de Suprimentos

Esquema de classificação proposto por Desrochers, Lenstra e Savelsbergh (1990)

CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA

- tipo de rede
 - . custos euclidianos
 - . rede não direcionada
 - tipo de estratégia de serviço
 - . é permitida divisão de demanda (a demanda pode ser satisfeita com mais de uma visita, desde que em dias diferentes)
 - . não há cargas de retorno
 - . veículo pode fazer várias rotas consecutivas
 - . rotas começam e terminam no depósito
-

Classificação do Problema de Transporte de Suprimentos

Classificação de Problemas de Roterização

- Referências: Bodin e Golden (1981), Bodin et al. (1983)
 - Problemas de Roteirização de Veículos
 - Problemas de Programação de Veículos
 - Problemas Combinados de Roteirização e Programação
 - Referência: Ronen (1993)
 - Dimensionamento/composição e alocação de frota
 - Problema Combinado de roteirização e armazenagem
 - Velocidade ótima de cruzeiro
 - Programação de embarcações
-

Classificação do Problema de Transporte de Suprimentos

- Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Restrição de Janela de Tempo (PRPVRJT)
 - Problemas a serem estudados
 - ✓PRPVRJT
 - ✓Problema de Coleta e Entrega com Restrição de Janela de Tempo (dial-a-ride)
 - Complexidade do Problema
 - Necessidade de se propor um procedimento de solução informatizado
-

Procedimento de Solução

Solomon (1987)

- VRSPTW
 - Heurísticas de construção de rotas
 - Incorporação dos aspectos temporais
 - Conceito de Push Forward (PF)
 - Base de dados padrão, utilizada por muitos trabalhos publicados a seguir
 - Melhor heurística: I1
-

Heurística I1 de Solomon

Estrutura básica

Passo 1

Teste de viabilidade de inserção para cada cliente não alocado em cada posição na rota sendo construída

Utiliza conceito de PF para teste de viabilidade de inserção de um cliente (testa somente o cliente a ser inserido e os clientes após a posição de inserção)

Heurística I1 de Solomon

Passo 2

Para cada cliente u não alocado, calcula c_1 para cada posição, e escolhe a melhor posição viável de inserção

$$\begin{aligned} \text{Min } c_1 &= \alpha_1 c_{11} + \alpha_2 c_{12}, \\ \alpha_1 + \alpha_2 &= 1, \quad \alpha_1 \geq 0, \alpha_2 \geq 0 \end{aligned}$$

$$c_{11} = d_{iu} + d_{uj} - \mu d_{ij} \text{ (acréscimo de distância causado pela inserção)}$$

$$c_{12} = b_{j/u} - b_j \text{ (acréscimo no início do atendimento do próximo cliente na rota após a inserção)}$$

c_1 pondera o acréscimo de tempo e distância causado pela inserção do cliente u na rota

Heurística I1 de Solomon

Passo 3

Escolhe o cliente a ser inserido, aquele que maximiza a função

$$\text{Max } c_2 = \lambda d_{0u} - c_1(i, u, j), \quad \lambda \geq 0$$

A função c_2 é a diferença entre a distância direta da base ao cliente u e o acréscimo em tempo e distância causados pela inserção (c_1), utilizando um coeficiente de ponderação λ

Portanto a heurística I1 tenta maximizar o benefício de se servir o cliente na rota sendo construída ao invés de servi-lo diretamente, sendo a melhor posição de inserção aquela que minimiza os acréscimos de tempo e distância necessários para servir esse cliente.

Adaptações para o algoritmo APTSP

- Agrupamento de requisições (restrição de 1 única visita por dia por unidade marítima)
 - Frota heterogênea (custos operacionais, velocidades e capacidades de carga diferentes)
 - Critério de seleção de embarcação (menor custo variável)
 - Teste de limite de “distância temporal”
 - Restrição de disponibilidade da requisição na base
 - Restrições dupla de autonomia (diesel e água)
 - Restrição de janelas de tempo da embarcação
 - data inicial de disponibilização
 - docagem
 - Restrições de múltipla capacidade de carga
 - capacidade do convés (área e tonelagem)
 - capacidade de cada tipo de tanque (volume)
 - capacidade total (tonelagem)
 - Desenvolvimento de interface amigável
 - interação usuário / sistema roteirizador
 - facilidade de alteração de parâmetros na tela do sistema
-

Implementação Computacional

- linguagem Visual Basic
 - plataforma microcomputador padrão PC
 - sistema operacional Windows 95
 - base de dados implementada em banco de dados relacional formato MDB (Access)
 - interface para edição de dados de entrada
 - relatório de desempenho econômico-operacional das embarcações
 - relatório de atendimento de requisições
 - relatório de viagens
 - relatório de requisições não atendidas
-

Cenário para Testes (escala reduzida)

- cenário em escala reduzida, utilizado por Brinati, Mesquita e Becker (1993) para testes do algoritmo ADPOFS
 - horizonte de programação - 30 dias
 - 5 unidades marítimas , 1 base
 - 3 embarcações
 - 200 requisições
 - 2 cargas de tanques/silos e 3 cargas de convés
 - custo variável (combustível) por tonelada transportada
-

Testes / Análise Paramétrica

$$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 1, 0)$$

$$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 0, 0, 1)$$

$$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 1, 0)$$

$$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (0, 1, 0, 1)$$

$$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 1, 0)$$

$$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 0, 0, 1)$$

$$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 1, 0)$$

$$(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 1, 0, 1)$$

critério de inicialização 1, com d igual a 1,5 ou 4,0 dias

critério de inicialização 2, com d igual a 1,0 ; 1,5 ; 2,0 ou 4,0

Efeito dos parâmetros α_1 , α_2

Tabela 5– Resultados com critério de inicialização 2, critério de limite de distância temporal $d = 1,5$ dias, variando os parâmetros μ , λ , α_1 , α_2

Parâmetros	Número de requisições não atendidas	Número de viagens realizadas	Custo variável por tonelada para toda a frota (US\$/ton)
$(\mu , \lambda , \alpha_1 , \alpha_2) = (0 , 0 , 1 , 0)$	66	15	12,33
$(\mu , \lambda , \alpha_1 , \alpha_2) = (0 , 1 , 1 , 0)$	66	15	12,33
$(\mu , \lambda , \alpha_1 , \alpha_2) = (1 , 0 , 1 , 0)$	59	16	12,88
$(\mu , \lambda , \alpha_1 , \alpha_2) = (1 , 1 , 1 , 0)$	38	17	10,88
$(\mu , \lambda , \alpha_1 , \alpha_2) = (0 , 0 , 0 , 1)$	4	31	8,11
$(\mu , \lambda , \alpha_1 , \alpha_2) = (0 , 1 , 0 , 1)$	4	31	8,01
$(\mu , \lambda , \alpha_1 , \alpha_2) = (1 , 0 , 0 , 1)$	4	31	8,11
$(\mu , \lambda , \alpha_1 , \alpha_2) = (1 , 1 , 0 , 1)$	4	31	8,01

Efeito dos parâmetros α_1 , α_2

- Os parâmetros α_1 e α_2 ponderam respectivamente o acréscimo de distância e o acréscimo de tempo na função de custo c_1 em cada inserção. Nas tabelas 2 a 7 verifica-se que para mantidos iguais os outros parâmetros do algoritmo , quando $(\alpha_1 , \alpha_2) = (0 , 1)$ os resultados são bem melhores do que quando $(\alpha_1 , \alpha_2) = (1 , 0)$. Ou seja, quando apenas o acréscimo de tempo é considerado os resultados são bem melhores do que quando apenas o aspecto de acréscimo de distância é considerado, mantidos inalterados os outros parâmetros.
- Esses resultados corroboram os resultados originais para a heurística I1 relatados por Solomon (1987), que conclui que as soluções com $(\alpha_1 , \alpha_2) = (0 , 1)$ apresentaram melhores resultados do que aqueles com $(\alpha_1 , \alpha_2) = (1 , 0)$, principalmente em problemas com grande número de clientes alocados por veículo (que não é o caso do Problema de Transporte de Suprimentos) e/ou alta densidade de clientes com janela de tempo (que é o caso do Problema de Transporte de Suprimentos, com 100% de clientes com janela de tempo)

Efeito do limite de distância temporal d

Tabela 10 – Resultados com critério de inicialização 2
valores dos parâmetros $(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,9, 0,1)$

Parâmetros	Número de requisições não atendidas	Número de viagens realizadas	Custo variável por tonelada para toda a frota (US\$/ton)
d = 1,0	6	36	8,04
d = 1,2	0	35	7,84
d = 1,3	0	35	7,84
d = 1,4	7	29	7,50
d = 1,5	4	31	7,79
d = 1,6	4	32	8,17
d = 1,7	15	21	8,06
d = 2,0	23	21	8,40
d = 4,0	25	17	8,55

Efeito do limite de distância temporal d

- O critério de limite de distância temporal (d) tem como objetivo restringir o número de requisições candidatas à inserção a cada momento durante a construção de uma rota, diminuindo o tempo de processamento. Evita também que se insira no fim da rota uma requisição que esteja distante temporalmente, o que pode piorar a qualidade da solução.
 - Os melhores resultados foram obtidos para d entre 1 e 2 dias. Para entender esse efeito, considere que a ordem de grandeza do tempo de ida e volta da base para uma unidade marítima é de cerca de 11 a 15 horas para o Astro Cação e Astro Agulha, e de 9,2 a 12,5 horas para o Maersk Detector. Considere também que o tempo de preparação na base é de 12 horas para o Astro Cação, 18 horas para o Astro Agulha e 24 horas para o Maersk Detector. Assim o tempo total de ida e volta mais a preparação na base é da ordem de 0,95 a 1,04 dias (23 a 25 horas) para o Astro Cação, 1,20 a 1,29 dias (29 a 31 horas) para o Astro Agulha e 1,38 a 1,52 dias (33,2 a 36,5 horas) para o Maersk Detector.
-

Efeito do limite de distância temporal d

- A cada momento, durante a construção da rota, as restrições a serem analisadas são restringidas pelo valor de d . Por exemplo, quando d fica próximo de 1 restringe-se o problema, já que somente serão consideradas requisições próximas no tempo, e o algoritmo fica míope, perdendo a capacidade de enxergar adiante. Para valores de d maiores, têm-se um efeito inverso, pois o algoritmo estará olhando "muito longe" no tempo, eventualmente inserindo uma requisição distante no tempo para aproveitar a capacidade residual da embarcação (que não pode ser utilizada para requisições anteriores que demandariam maior espaço ou causariam alguma quebra de restrição), o que causará aumento no tempo de espera. Ou seja, nem sempre lotar a embarcação leva a uma melhor solução.
 - Para d da ordem de 1,5 dias consegue-se uma ponderação entre esses efeitos. Isso faz sentido, pois é como se, a cada momento, ao se decidir pela inserção de uma nova requisição fosse necessário decidir entre voltar para a base, gerando um acréscimo de tempo da ordem de 1,0 a 1,5 dias (dependendo da embarcação) considerando os tempos de ida/volta/preparação na base, ou inserir a requisição na rota. Se essa requisição gerar um tempo de espera de mais de 1,5 dias, provavelmente a volta para a base e inserção da requisição em uma nova rota geraria uma solução melhor, com menor número de requisições não atendidas e menor custo.
-

Efeito do Critério de Inicialização

Tabela 9 – Comparação entre os critérios de inicialização 1 e 2
 $\mu = (0 \text{ ou } 1), \lambda = (0 \text{ ou } 1)$

Parâmetros	Melhor critério de inicialização
d = 1,5 dias, $(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 1)$	critério 1 e 2 se eqüivalem
d = 1,5 dias, $(\alpha_1, \alpha_2) = (1, 0)$	critério 2
d = 4,0 dias, $(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 1)$	critério 1 e 2 se eqüivalem
d = 4,0 dias, $(\alpha_1, \alpha_2) = (1, 0)$	critério 2

Efeito do Critério de Inicialização

- O critério de inicialização 2, que escolhe como primeiro cliente aquele cuja janela de tempo vence primeiro e que, portanto, prioriza o aspecto temporal para a inicialização da rota, proporcionou melhores resultados. Isso pode ser verificado comparando-se os resultados da tabela 2 com os da tabela 5 e os da tabela 3 com os da tabela 7. Essa comparação está resumida na tabela 9.
 - Quando $(\alpha_1, \alpha_2) = (1, 0)$, o critério de inicialização 2 gera soluções melhores que o critério 1 (porém ambas sempre piores do que quando $(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 1)$), o que pode ser creditado à priorização do aspecto temporal na abertura de rotas que serão construídas levando em conta apenas aspectos espaciais a partir da 2a requisição inserida. Quando $(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 1)$, os critérios de inicialização 1 e 2 se equivalem. Aparentemente, uma possível decisão errada na escolha da 1a requisição pelo critério 1 é revertida pelo desempenho superior com os parâmetros $(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 1)$, porém os testes realizados não permitem concluir esse aspecto de modo decisivo.
-

Melhor Solução (cenário em escala reduzida)

Tabela 11 - Desempenho econômico-operacional da frota de acordo com o Algoritmo APTSP para o cenário em escala reduzida.

Critério de inicialização 2, $d = 1,3$ dias, $(\mu, \lambda, \alpha_1, \alpha_2) = (1, 2, 0,9, 0,1)$

Parâmetro	Unidade	Astro Agulha	Astro Cação	Maersk Detector	Frota
Custo variável total no período	US\$	25.914,92	8.357,77	46.235,45	80.508,14
Carga total transportada	ton	3718,00	132,00	6418,00	10268,00
Distância total percorrida	milhas	1943,25	1461,28	2094,32	5498,85
Custo variável por tonelada	US\$/ton	6,97	63,32	7,20	7,84
Número de viagens realizadas	unid	12	11	12	35
Requisições não atendidas	unid	-	-	-	0

Comparação APTSP / ADPOFS

- aumento na quantidade de requisições atendidas, de 96% para 100%,
- redução de custo variável por tonelada transportada de 2,12 %.
- para nível de serviço próximo ao do obtido com o algoritmo ADPOFS, com 96,5% de requisições atendidas, a redução de custo variável por tonelada transportada foi de 6,36%

Robustez do Algoritmo APTSP

- Para critério de inicialização 2,
limite de distância temporal = 1,5 dias
 $\mu = 1$, $\lambda = 2$, $\alpha_1 > 0$ e $\alpha_2 > 0$
sempre obteve-se redução de custo e aumento da quantidade de requisições atendidas
 - Na utilização real do algoritmo APTSP bastaria
 - calibrar o algoritmo para o cenário, determinando o critério de inicialização, os valores de μ e λ , e uma faixa de valores para d , α_1 e α_2
 - realizar a programação variando valores de d , α_1 e α_2 , escolhendo-se a melhor solução
-

Simulação de Cenário

Cenário

- Astro Cação - única a levar rancho
- eliminação da restrição de visita única

Resultados

- Maersk Detector
 - redução de custo/ton 5,41%
 - mesmo número de viagens (12)
 - Astro Agulha
 - redução de custo/ton 10,04%
 - mesmo número de viagens (12)
 - Astro Cação
 - redução de custo/ton 10,66%
 - 11 para 22 viagens
 - Frota
 - aumento de custo/ton 4,84%
 - **causa: maior uso do Astro Cação**
-

Cenário / Escala semi-real

- cenário em escala semi-real
 - horizonte de programação - 120 dias
 - 40 unidades marítimas , 1 base
 - 60 embarcações
 - 2400 requisições
 - 2 cargas de tanques/silos e 1 carga de convés
 - custo variável (combustível) por ton transportada

 - tempo de processamento - 2h10m
-

Considerações finais

- Material de referência para estudo do Problema de Transporte de Suprimentos
 - Referência na consulta dos trabalhos originais sobre janela de tempo
 - Facilidade de adaptação da heurística I1
 - Implementação computacional satisfatória
 - qualidade da solução
 - robustez do algoritmo
 - Possibilidade de utilização em problemas de escala real
 - interface amigável
-

Próximos passos

- Função de custo incluindo
 - lotação plena da embarcação
 - tempo de espera total na rota
 - Heurística de varredura (agrupamento e roteirização)
 - Heurística de melhoria Ref. 5 Thompson e Psaraftis
 - Interface Simulação / Roteirização
 - inclusão de aspectos probabilísticos do problema (condição de mar, tempos de carregamento etc)
 - Metaheurística
-