



**TRANSPORTE MARÍTIMO DE CARGA NA BACIA DE CAMPOS:
UMA ABORDAGEM POR CLUSTERIZAÇÃO CAPACITADA
E ROTEIRIZAÇÃO DE EMBARCAÇÕES**

Juliana Beatriz Carvalho de Oliveira Soares*

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite*

Programa de Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ

Av. Athos da Silveira Ramos 149, bl. F, sl. F103

E-mails: juliana_bcos@yahoo.com.br, laura@pep.ufrj.br.

RESUMO

A indústria do petróleo tem crescido bastante nos últimos anos e investimentos tecnológicos são essenciais para a melhoria de seus processos. Um sistema de transporte de qualidade é fundamental para garantir a mobilidade dos produtos de forma eficiente e pontual, reduzindo o custo logístico total. Este trabalho aborda um problema de transporte de carga para unidades marítimas na Bacia de Campos, em operações de Exploração e Produção de uma empresa de petróleo. O objetivo principal é definir as rotas de atendimento às unidades marítimas via a solução de um problema de roteamento de veículos com frota heterogênea e janelas de tempo. Como o sistema tem que fornecer respostas em tempo real, utilizam-se métodos heurísticos, para obtenção de uma clusterização prévia, seguidos de um algoritmo exato de roteirização. O resultado alcançado por essa metodologia é comparado com a solução adotada atualmente na empresa, com avaliações de melhoria na minimização dos custos.

Palavras-chave: Roteirização de embarcações, Problema de roteamento de veículos com frota heterogênea e janelas de tempo, Problema de clusterização.

Área principal: Roteamento.

Abstract

The oil industry has grown considerably in recent years and technological investments are essential for the improvement of its processes. A quality transportation system is critical to ensure the mobility of products efficiently and on time, reducing the total logistics cost. This work deals with the problem of maritime transport of cargo to maritime units in the Campos Basin, in exploration and production operations of an oil company. The main objective is to define the routes to support maritime units by solving a vehicle routing problem with heterogeneous fleet and time windows. As the system has to provide answers in real time, we use heuristic methods to obtain prior clustering, followed by an exact algorithm for routing. Finally, the result achieved by this method is compared with the solution currently adopted in the enterprise, with assessments of improvement in reducing costs.

Keywords: Vessels routing, Vehicle routing problem with heterogeneous fleet and time windows, Clustering problem.

Main Area: Routing.

* Bolsista do CNPq - Brasil

1 Introdução

A indústria do petróleo tem crescido bastante nos últimos anos e investimentos tecnológicos são essenciais para a melhoria de seus processos. Pesquisas têm se desenvolvido nessa área, pois um sistema de transporte de qualidade é fundamental para garantir a mobilidade dos produtos de forma eficiente e pontual, reduzindo o custo logístico total.

Especificamente, trata-se o transporte marítimo de carga na Bacia de Campos, uma das atividades mais importantes em operações marítimas de Exploração e Produção de petróleo, que aborda o fornecimento dos mais diversos tipos de carga, como por exemplo, carga geral, equipamentos, rancho e água potável, óleo e diesel.

As operações marítimas de Exploração e Produção (E&P) são apoiadas por um sistema logístico e de serviços, chamado de apoio marítimo. Esse sistema é composto por portos, aeroportos, armazéns, helicópteros e utiliza diversas embarcações especializadas, que transportam carga de convéses para as unidades marítimas (UMs) das Bacias de Campos, de Santos e do Espírito Santo.

Essas Bacias representam mais de 80% da produção brasileira de petróleo e gás, e são atendidas pelos portos de Macaé, principal porto de apoio marítimo do Brasil, Rio de Janeiro e Vitória, representando mais de 50% da carga de convés de petróleo no Brasil.

O objetivo principal desse trabalho é definir as rotas de atendimento às unidades marítimas. Como o sistema tem que fornecer respostas em tempo real, a estratégia consiste em unir métodos heurísticos, para obtenção de uma clusterização prévia, a um algoritmo exato de roteirização, a fim de desenvolver uma ferramenta de suporte à decisão para a roteirização das embarcações. Dessa forma, as rotas elaboradas devem atender às unidades marítimas, considerando a localização dessas unidades dentro de seus respectivos clusters, as suas demandas por suprimentos e as janelas de tempo de atendimento permitidas em cada unidade.

O estudo limita-se aos campos operados pela empresa de petróleo nas Bacias de Campos, e ao carregamento e o transporte de carga de convés partindo do porto de Macaé

Contudo, é importante destacar que, apesar de o trabalho estar restrito a essa Bacia, é possível expandi-lo às demais bacias em que a empresa opera no Brasil, visto que o sistema operacional é semelhante. Portanto, qualquer ganho obtido pela solução do modelo tem grande potencial para ser aplicado a outros locais.

Os custos das operações marítimas e o valor da produção de óleo são muito altos, em especial o aluguel das sondas, que possuem uma taxa diária média de US\$ 500 mil. Logo é necessário evitar a interrupção dessas atividades por causa de atrasos no transporte de cargas, destacando-se, assim, a importância desse planejamento para minimização de custos dessas operações.

1.1 Clientes

Os principais clientes são as unidades de produção, as sondas de perfuração e embarcações especiais. As unidades de produção são do tipo *Floating, Production, Storage and Offloading* (FPSO), plataformas semi-submersíveis (SS) e plataformas fixas.

As sondas de perfuração são do tipo SS ancorada, SS de posicionamento dinâmico, *jack-up* e navios-sonda, todos realizando o mesmo trabalho, porém com capacidades e performances diversificadas.

Em Lopes (2011) são relatadas diversas características sobre o problema e algumas delas são descritas nesse estudo, como, por exemplo, as demandas das unidades marítimas. Essa

demanda varia bastante entre as unidades e, para uma mesma unidade, pode haver uma grande variação de uma semana para outra.

Para as unidades de produção, que são responsáveis pela extração e pelo processamento primário do petróleo e gás natural, a demanda segue um regime permanente, e, por isso, pode ser aproximada por distribuições normais de probabilidade.

Já as sondas de perfuração possuem uma demanda muito mais variável, influenciada pela atividade que está sendo realizada por cada sonda no momento. Além disso, pode ocorrer uma elevada quantidade de pedidos de emergência, pois além de estarem constantemente sendo mobilizadas para novas áreas, possuem baixa capacidade de armazenamento. Essas sondas também são as UMs mais caras, logo o custo do atraso de um dia para um insumo imprescindível para seu funcionamento gera grandes perdas.

1.2 Embarcações

As embarcações utilizadas são do tipo *Platform Supply Vessel* (PSV), navios especializados no apoio às plataformas de perfuração ou produção. Sua principal função é transportar suprimentos para as plataformas. Possuem área útil de convés (pode-se considerar como área útil 75% da área total do convés) que pode chegar a 750 m².

1.3 Cargas

As cargas podem ser divididas nas seguintes categorias: carga geral, rancho e água potável, tubos e *risers*, produtos químicos, água industrial, óleo diesel, fluidos e insumos para perfuração. Esse artigo trata especificamente do transporte de carga geral por PSVs.

1.4 Descrição do problema

A base recebe os pedidos enviados pelas UMs especificando demanda e janelas de tempo para o recebimento de materiais. Os pedidos das diversas UMs são programados para serem atendidos por embarcações que devem atracar no porto. Um porto contém berços e a escolha para que uma embarcação atraque em um determinado berço depende de sua prioridade e do tipo de berço disponível (visto que determinadas embarcações só podem atracar em alguns berços específicos).

Ao definir a prioridade que uma embarcação tem para atracar são considerados diversos fatores: rota a ser realizada, a demanda para a rota, os períodos para atendimento e o tipo de embarcação cuja capacidade do convés atenda a demanda de todas as unidades marítimas que compõem o cluster. A ordem de chegada ao porto é considerada somente depois de verificar os critérios citados anteriormente.

Após atracar no berço, o barco está pronto para começar o carregamento. O carregamento é feito de acordo com a demanda exigida pelo cluster selecionado. Após o carregamento, o barco parte em direção a primeira unidade marítima da rota.

Em cada UM a embarcação atraca, descarrega o material e faz *backload*, se houver. Contudo são necessárias algumas verificações antes de realizar este ciclo: durante o mau tempo a embarcação fica impossibilitada de atracar, e espera até que possa realizar a entrega. Além disso, é necessário saber se a plataforma está disponível, já que diversas intervenções podem acontecer paralelamente, como por exemplo, o pouso de um helicóptero, que não permite a atracação.

Sendo assim, realizadas todas as visitas após o atendimento à última unidade marítima, o barco retorna ao porto e se torna disponível para uma próxima viagem. Em geral, as embarcações trazem materiais das plataformas para serem desembarcados e, na maioria dos casos, ficam nos barcos esperando estes serem requisitados. Dessa maneira, a atracação acontece uma única vez para carga e descarga, evitando perda de tempo. A exceção acontece quando há prioridade para a carga trazida de algum barco, então o barco descarrega e vai para

área de fundeio, que é onde as embarcações aguardam até que sejam requisitadas para carregamento.

2 Revisão bibliográfica

O presente trabalho aborda um tema frequentemente estudado em pesquisa operacional, o Problema de Roteamento de veículos (PRV). Este problema pode ser encontrado em várias referências, como Laporte e Osmam, (1995); Toth e Vigo, (2002); Laporte, (2009); Gendreau e Bräysy, (2005); entre outros. A dificuldade do problema encontra-se em resolver o PRV com frota heterogênea e janelas de tempo, que são potenciais complicadores do problema, principalmente quando as respostas têm que ser fornecidas em tempo real.

O controle do fluxo da entrega de produtos ao consumidor (logística de distribuição), a aquisição de materiais, o processo de produção ou o descarte de alguns produtos fazem parte do sistema logístico de uma empresa. Segundo Guerra, Murino e Romano (2007), o bom desempenho do sistema de transporte é fundamental para garantir a mobilidade dos produtos de forma eficiente e pontual, reduzindo os custos de transporte, que em determinados casos podem chegar a 50% do custo logístico total.

2.1 Clusterização

Em Koskosidis e Powell (1992) é afirmado que a essência dos Problemas de Clusterização Capacitados (PCC) é particionar um conjunto de n consumidores dentro de k grupos, todos mutuamente exclusivos e coletivamente completos, sendo cada grupo restrito em tamanho. O PCC é um caso especial do Problema de Localização de Facilidades e usado em Problemas de Atribuição e P-medianas.

Em Mulvey e Beck (1984) são apresentados dois algoritmos eficazes para clusterização, que envolvem o agrupamento de pontos, maximizando a homogeneidade dos pontos dentro do cluster e, ao mesmo tempo, a heterogeneidade entre pontos de clusters diferentes. Neste artigo, o interesse está em minimizar as distâncias para clientes dentro de um mesmo cluster. Primeiramente, eles propõem uma heurística que se assemelha a que pode ser encontrada em MacQueen (1967), e depois, essa heurística é modificada e combinada com uma heurística Lagrangeana, ambas heurísticas obtêm boas soluções.

Uma aproximação heurística híbrida para o *Capacitated Centred Clustering Problem*, onde cada cluster tem um centróide localizado no centro geométrico de seus pontos e cobre todas as demandas do conjunto de n pontos, é apresentada em Chaves e Lorena (2010). A meta-heurística chamada *Cluster Search* consiste em detectar áreas promissoras do espaço de busca e são exploradas através de métodos de busca local como *Simulated Annealing*.

Para aplicação do PCC em roteamento de veículos é preciso levar em conta não só a localização da carga, mas também a presença de coleta e janelas de tempo; portanto, o objetivo, além de “clusterizar”, é completar a rota e programar cada veículo respeitando-se as janelas de tempo. Quando o único critério não é a distância, existindo por exemplo limitações de tempo, o problema de clusterização se torna muito mais complicado. As heurísticas descritas a seguir foram concebidas para o problema de roteamento de veículos com a intenção de clustear primeiro e ordenar depois, logo podem ser usadas para a obtenção de clusters viáveis.

2.2 Roteirização

Devido a sua relevância prática, e por ser considerado de difícil resolução, o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) é um dos problemas de otimização combinatória mais estudados e utilizados com mais frequência em diferentes áreas de pesquisa Toth e Vigo (2002). De acordo com Laporte e Nobert (1987), o PRV pode ser descrito como um problema de projeção das melhores rotas de entregas de um ou mais depósitos para um conjunto de

consumidores e sendo assim, constitui uma generalização do problema do caixeiro viajante (PCV), que tem como objetivo determinar a menor rota visitando cada um dos n pontos precisamente uma vez e formando um ciclo ao voltar para o ponto de origem.

Comumente, o PRV tem como objetivo minimizar distância ou o tempo total da rota, e envolve coleta e distribuição física de mercadorias, informações, serviços ou pessoas. A alocação de clientes para cada veículo e a sequência do atendimento são algumas decisões a serem tomadas na roteirização.

O problema básico pode envolver diversos tipos de variantes, dependendo da exigência e do sistema operacional específico. O serviço pode contar com entregas e coletas, com uma frota heterogênea de veículos, o tamanho de cada rota pode ser limitado, pode existir uma relação entre os clientes, a entrega pode ter que ocorrer dentro de janelas de tempo, múltiplos depósitos, várias visitas, entregas fracionadas, entrega plena da carga, roteamento em múltiplos períodos, dentre outros. Em Gendreau e Bräysy (2005) encontramos PRV com janelas de tempo, em que os veículos devem realizar a rota dentro de um dado intervalo de tempo.

Os algoritmos exatos para PRV envolvem desde métodos básicos até programações matemáticas de alta complexidade Laporte (2009). Contudo, por pertencer à categoria conhecida como NP- difícil, possui ordem de complexidade exponencial, e, por isso, esses algoritmos raramente podem lidar com casos envolvendo mais de 100 vértices Cordeau, Laporte, Savelsbergh e Vigo (2006).

Quando se trata de respostas em tempo real, a maioria dos estudos tem por base heurísticas ou meta-heurísticas. Os métodos heurísticos são classificados em três grupos Cordeau, Laporte, Savelsbergh e Vigo (2006), mas destaca-se a seguir somente o que foi utilizado nesse trabalho – o método de duas fases, que consiste em partição em dois subproblemas: *Clustering* que determina a partição de consumidores dentro de subconjuntos, cada um correspondendo a uma rota, e *Routing* que determina a sequência de consumidores em cada rota. Quando se tem *clustering* primeiro e *routing* depois, os clientes são primeiro agrupados e, por conseguinte são determinadas as rotas sequenciando-os dentro de cada grupo.

3 Metodologia

Como o sistema tem que fornecer respostas em tempo real, a metodologia empregada consiste em aplicar métodos heurísticos (heurística de varredura e heurística por “*seeds*”) para obtenção de uma clusterização prévia, e, posteriormente, aplicar um algoritmo exato de roteirização, a fim de desenvolver uma ferramenta de suporte à decisão para a roteirização das embarcações. Dessa forma, as rotas elaboradas devem atender às unidades marítimas, considerando a localização dessas unidades dentro de seus respectivos clusters, as suas demandas por suprimentos e as janelas de tempo de atendimento permitidas em cada unidade.

Os dados foram coletados através de planilhas cedidas pela empresa de petróleo, onde são especificados: demandas, tempo de serviço e janelas de tempo nas unidades, rotas feitas atualmente pela empresa, clusters atuais das unidades marítimas, localização das unidades, entre outros que foram necessários para realização desse estudo.

Como não é possível saber com precisão e antecedência a demanda, foram calculados a demanda semanal média e o desvio padrão. Os tempos para a embarcação atracar e a alocação da carga também são descritos e utilizados de acordo com cada necessidade.

A capacidade considerada para os PSV é a área útil de convés e, nesse caso, foram considerados barcos com capacidade 400 m² e 600 m² de área livre de convés, uma aproximação da capacidade real dos barcos disponíveis para carregamento na Baía de Campos. A numeração dada aos barcos está relacionada às suas capacidades, barcos numerados de 1 a 14 possuem

capacidade de 400m² de área livre de convés, enquanto barcos numerados de 15 a 28 possuem capacidade de 600m² de área livre de convés.

3.1 Heurística de varredura para a clusterização capacitada

Na heurística de varredura, baseada em Gillett e Miller (1974), os *clusters* são formados girando uma semirreta com origem no porto e incorporando os clientes “varridos” por essa semirreta na mesma rota, até que o somatório das demandas de todos os clientes da rota viole a restrição de capacidade da embarcação. Então, outra embarcação é selecionada e outra rota é composta.

Essa é uma clusterização relativamente simples, e, combinada com um algoritmo exato para PRV, obtém boas soluções. O processo heurístico foi realizado em *Visual Basic for Application* (VBA) utilizando o software Excel.

Para facilitar a implementação, os vértices foram representados por suas coordenadas polares (θ_i, ρ_i) , atribuindo-se o valor $\theta_i = 0$ a um vértice i e calculando-se os demais ângulos a partir de $(1, i)$. Após isso, os vértices são classificados em ordem crescente de seus ângulos e clusterizados de acordo com a capacidade do barco.

3.2 Heurística por “seeds” para a clusterização capacitada

Essa heurística baseia-se em um algoritmo presente no artigo Koskosidis e Powell (1992), posteriormente adaptado por Longhi (2014), onde se acrescentada uma restrição de limite máximo entre o início das janelas de tempo, a fim de refinar as soluções para o roteamento.

A solução inicial considerada trata-se da própria solução utilizada pela empresa atualmente em uma de suas muitas programações, e esse método é composto de duas fases.

A primeira fase consiste em realizar todas as trocas de posições possíveis entre duas unidades, com o objetivo de se encontrar a configuração com o menor custo. Com o mínimo encontrado, procura-se fazer uma reclusterização que refaça a configuração e aumente a quantidade de soluções possíveis. Para isso, determinam-se *seeds*, de onde nascerão novos clusters. Os *seeds* são determinados como a unidade marítima mais próxima do centro geométrico dos antigos clusters.

Com os novos *seeds* determinados, uma nova clusterização é feita. O objetivo é atribuir cada unidade ao cluster cujo *seed* encontra-se mais próximo. A ordem da clusterização é determinada por uma função *Regret*, que é definida como a diferença entre a primeira e a segunda semente mais próxima, essa função representa a penalidade de atribuir ao cliente i a sua segunda semente mais próxima ao invés da primeira, objetivando determinar as unidades em que a atribuição a clusters mais longínquos resulta em maiores perdas.

A partir daí, os clientes que não são sementes são ordenados de forma decrescente e cada um é atribuído a semente mais próxima disponível. Se a restrição de capacidade é violada então o cliente é atribuído ao segundo mais próximo e assim sucessivamente.

Na segunda fase procura-se, dentro de cada cluster, um cliente que minimize o custo total, esse cliente torna-se a nova semente. Se uma ou mais sementes forem encontradas então o algoritmo retorna à fase 1. O algoritmo itera entre as fases 1 e 2 até que não seja mais possível melhorar.

3.3 Método exato para o roteamento

A modelagem desenvolvida neste trabalho é uma adaptação da que pode ser encontrada no livro Desaulniers, Desrosiers e Solomon (2005), e é descrita a seguir.

O modelo é definido por uma frota de veículos K , o conjunto de todos os vértices, $L = \{0, 1, 2, \dots, n+1\}$, formado pelo conjunto de clientes $C = \{1, 2, \dots, n\}$, o porto $P = \{0\}$ e o porto fictício (de retorno) $P2 = \{n+1\}$. Este porto fictício é criado, pois, por causa das janelas de tempo, não há como os barcos retornarem ao porto de origem no tempo zero.

Os veículos (embarcações) possuem capacidades de ocupação q_k , cada cliente i possui janelas de tempo $[a_i, b_i]$, demandas d_i e tempos de serviços s_i (carga ou descarga de materiais). Para normalização das unidades de medida da função objetivo é necessária uma constante z que transforma quilômetros em horas.

A cada arco $(i, j), i \neq j$, é associado um custo c_{ij} que representa a distância entre os vértices i e j , e um tempo de viagem v_{ij} . Assume-se que $q_k, a_i, b_i, d_i, c_{ij}, v_{ij}$ são inteiros não negativos e s_i um inteiro positivo.

As variáveis de decisão incluem x_{ijk} , uma variável binária que possui valor igual a 1 se o cliente i está ligado ao j pelo barco k e 0 caso contrário, t_{ik} que representa o tempo de chegada do barco k ao cliente i , e h_{ik} que é o tempo que o barco espera até estar dentro da janela de tempo no cliente i .

O modelo é o seguinte:

$$\text{Min } \sum_{i \in L} \sum_{k \in K} \sum_{j \in L} c_{i,j,k} x_{i,j,k} + z \sum_{i \in L} \sum_{k \in K} t_{ik}, \text{ s.a.} \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in L} x_{i,j,k} = 1 \quad \forall i \in C \quad (2)$$

$$\sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in L} x_{i,j,k} \leq q_k \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in L} x_{0,j,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in L} x_{i,w,k} - \sum_{j \in L} x_{w,j,k} = 0 \quad \forall k \in K, \forall w \in C \quad (5)$$

$$\sum_{i \in L} x_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$x_{ijk}(t_{i,k} + v_{ij} + s_i + h_{ik} - t_{jk}) \leq 0 \quad \forall k \in K, \forall i, j \in L \quad (7)$$

$$t_{ik} + h_{ik} \geq a_i \quad \forall i \in L, \forall k \in K \quad (8)$$

$$a_i \leq t_{i,k} + h_{ik} + s_i \leq b_i \quad \forall k \in K, \forall i \in L \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall i, j \in L \quad (10)$$

$$t_{0k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$h_{0k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (12)$$

$$t_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall i \in L \quad (13)$$

$$h_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall i \in L \quad (14)$$

A função objetivo (1) minimiza a distância total da viagem e os tempos de chegada aos clientes. A restrição (2) garante que cada cliente é visitado exatamente uma vez, enquanto a restrição (3) garante que o veículo só pode ser carregado até sua capacidade. As equações seguintes (4) e (5) indicam que cada veículo deve partir do porto e que depois de sair de um cliente ele deve ir para outro cliente, respectivamente. A restrição (6) garante que todos os veículos devem chegar ao porto de retorno.

As inequações (7) e (8) estabelecem a relação entre o tempo de chegada de um veículo de um cliente ao seu sucessor, e que o tempo de serviço deve ser contado a partir do início da janela, respectivamente. As restrições (9) e (10) tratam das janelas de tempo das unidades marítimas e das restrições de integralidade sobre as variáveis de decisão x_{ijk} , respectivamente.

As restrições (11) e (12) fixam o tempo de chegada e o tempo de espera no porto em zero. Por fim, as restrições (13) e (14) tratam da não negatividade das variáveis t_{ik} e h_{ik} .

Uma observação importante é que os veículos que não são usados saem direto do porto para o porto fictício de retorno. Outra observação a ser feita é que a restrição (6) é não linear, mas pode ser linearizada conforme a restrição (15) a seguir:

$$t_{ik} + v_{ij} + h_{ik} - M(1 - x_{ijk}) \leq t_{jk} - s_i \forall k \in K, \forall i, j \in L, \quad (15)$$

onde M é uma constante que pode ser definida como: $\max\{b_i + v_{ij} + a_j\}, (i, j) \in L$.

4 Resultados computacionais

Todos os algoritmos foram implementados em um computador com processador Intel® Core™ i7-4770, CPU de 3,4GHz e Memória RAM de 16GB.

A roteirização feita atualmente pela empresa conta com uma distância total percorrida, para o mesmo conjunto de dados, de aproximadamente 5050 km, contendo 14 rotas.

4.1 Método exato: análise preliminar

Dada a natureza NP-difícil do problema em questão, era de se esperar que o método de *cut-and-branch* aplicado diretamente ao problema não apresentasse um bom *gap* de otimalidade dentro de um tempo computacional aceitável para uma resposta em tempo real, já que o problema completo conta com 102595 restrições e 99150 variáveis (95816 inteiras).

Por isso, o primeiro passo na resolução consistiu em uma análise preliminar do modelo proposto com esse método. Em testes com diferentes instâncias, observou-se que a partir de 16 UMs o modelo não era capaz de encontrar a solução ótima em um tempo computacional aceitável, visto que após 2h de computação, o *gap* de otimalidade ainda se encontrava por volta de 10% como visto na Tabela 1.

Número de clientes	Tempo de execução	Gap
5	0,5	0,00%
12	60	0,00%
14	487	0,00%
15	925	0,00%
16	7200	9,75%
24	7200	19,98%
30	7200	28,99%

Tabela 1 – Número de clientes X Gap

No gráfico da Figura 1, a seguir, que compara a chegada à melhor solução com a aproximação do limitante inferior, para 15 unidades marítimas, vê-se claramente que a melhor solução é encontrada em pouco tempo e o limitante inferior leva muitas iterações para comprovar o resultado. Já a curva dos limitantes para 16 unidades marítimas, onde, em um tempo computacional de 2h o *gap* de otimalidade ainda era de aproximadamente 10%. Pode-se perceber que com o acréscimo de apenas uma unidade ao modelo, o tempo de resolução cresce muito.

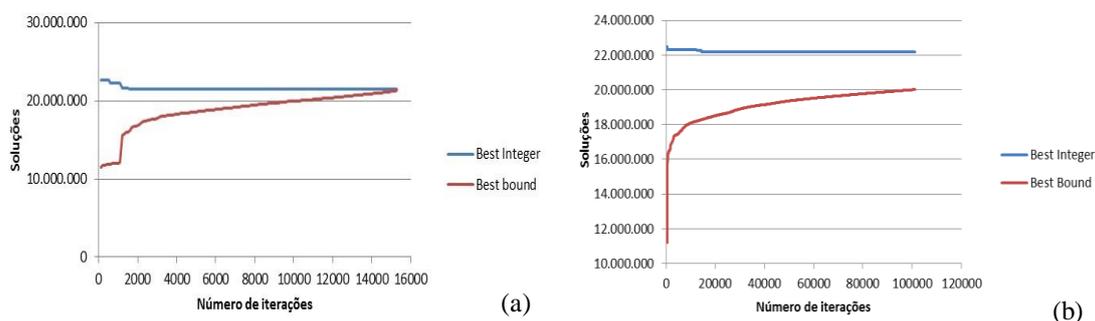


Figura 1- Análise melhor solução × limitante inferior para 15 unidades marítimas(a) Análise melhor solução × limitante inferior para 16 unidades marítimas(b)

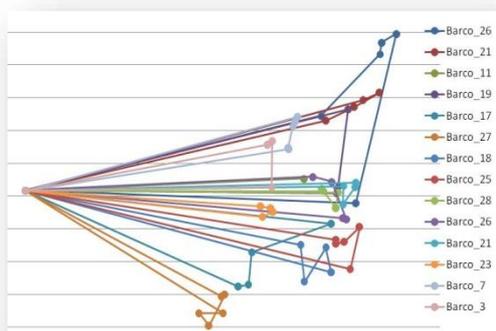
As análises mostradas anteriormente na Figura 1 anteriormente comprovam que o modelo atual precisa ser reforçado, com adição de novos cortes válidos e implementação de um método do tipo *branch-and-cut*. Porém, como havia um compromisso de tempo computacional para comparação com o método aplicado hoje pela empresa em questão, esta frente não era uma opção válida.

Sendo assim, a estratégia escolhida foi a de combinar as heurísticas de clusterização ao método exato, formando clusters com no máximo 15 UMs, levando-se em consideração as restrições de capacidade dos barcos, e posteriormente aplicar o modelo exato a esses clusters, levando em conta, além das capacidades dos barcos, as janelas de tempo para atendimento às UMs.

4.2 Aplicação do método exato diretamente nas rotas feitas atualmente pela empresa

Como método de avaliação e comparação, a solução com rotas atualmente utilizadas pela empresa foi clusterizada e aplicada ao método exato.

A clusterização foi feita somente com um critério de proximidade entre as rotas que formam os clusters, com o máximo de 15 unidades por cluster. A visualização gráfica das rotas após a aplicação do método exato a esses clusters é mostrada na Figura 2 a seguir.



(a)

Cluster	Distância Atual	Distância Nova
1	1645	1577
2	630	630
3	760	760
4	1124	1122
5	891	891
Distância Total	5050	4980
Tempo total	1140	1060

(b)

Figura 2 – Visualização rotas (a) e resultados comparativos (b)

Pode-se constatar que somente os clusters 1 e 4 tiveram modificações em suas rotas, em relação à solução empregada hoje pela empresa, e essas modificações levaram a uma redução de 1,39% na distância total percorrida.

4.3 Aplicação do método exato aos clusters obtidos por varredura

O próximo passo da estratégia utilizada consistiu em aplicar o algoritmo exato aos clusters formados por varredura. A Figura 3, a seguir, mostra todas as unidades marítimas roteadas pelo algoritmo exato, agora com restrições de janela de tempo, onde suas rotas são nomeadas pelo número do barco utilizado. Ao lado observa-se que a redução obtida para distância total percorrida em relação à solução atual da empresa foi pequena, menos de 1%, contudo a nova solução apresenta significativa redução de 4,7% no somatório de duração das rotas. Para uma comparação mais real de resultados, compararam-se também as rotas obtidas pela aplicação do modelo matemático diretamente na clusterização atual, já que o modelo que gera as soluções utilizadas atualmente pela empresa leva em consideração vários outros fatores além dos considerados nesse artigo. O resultado foram distância e tempo maiores, porém bem próximos.

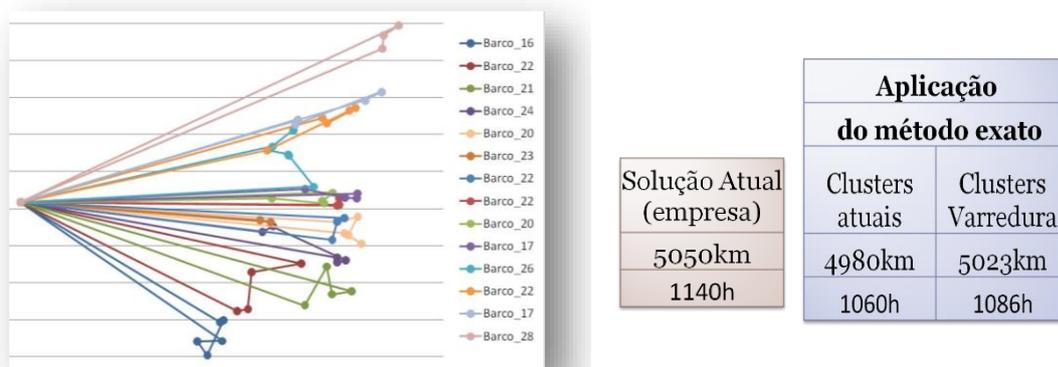


Figura 3 - Gráfico rotas algoritmo exato/clusterização por varredura e comparação de resultados (varredura)

4.4 Aplicação do método exato aos clusters obtidos por “seeds”

O último passo da estratégia utilizada consistiu em aplicar o algoritmo exato aos clusters formados por “seeds”. Essa heurística já possui um grau de complexidade um pouco maior que a anterior, e por isso possibilita encontrar melhores soluções.

Para imputar maior diversificação à solução heurística de clusterização + método exato, foram guardadas também as três melhores soluções anteriores à melhor solução de clusterização, como uma aposta para outras “direções de busca” para o algoritmo exato. Feito isso, as quatro soluções foram testadas no algoritmo exato e, ao analisar os resultados a segunda melhor solução, aplicada ao passo seguinte, resultou em uma roteirização final com uma redução maior nas distâncias. Neste gráfico (Figura 4) pode-se visualizar a distância percorrida em cada cluster e o somatório das distâncias em cada solução representada pela linha amarela.

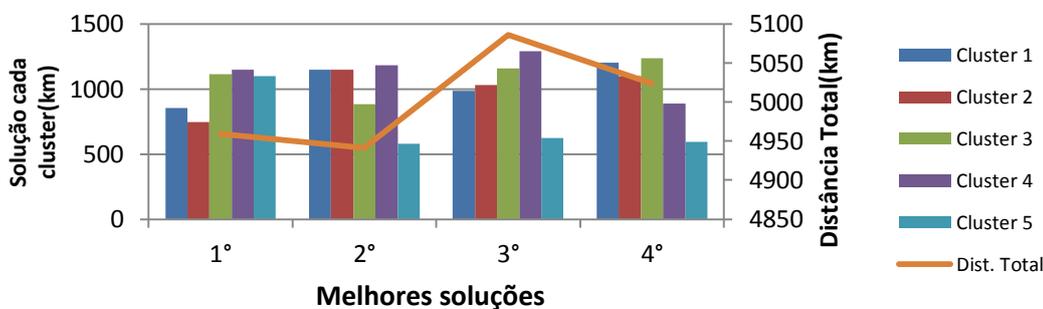


Figura 4 – Gráfico melhores soluções clusterização por seeds

A solução da clusterização, que gerou uma economia maior ao passar pelo algoritmo exato, que foi a segunda melhor solução, está representada na Figura 5, a seguir. A distância total

representou uma redução de 2,15% em relação ao original e 0,78% em relação ao método exato aplicado aos clusters atuais.

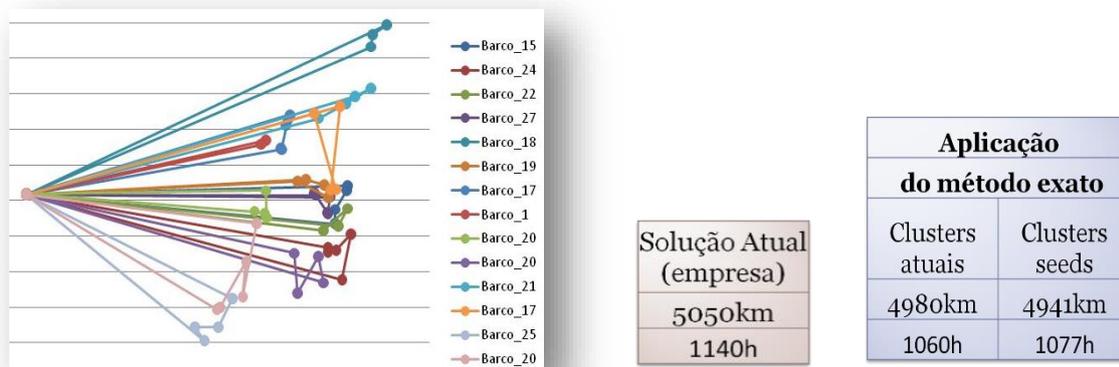


Figura 5- Visualização da rota e comparação das soluções

Portanto, na comparação dos resultados, percebe-se que ambas heurísticas, quando aplicadas em conjunto com o algoritmo exato, fornecem bons resultados. Contudo, na clusterização por *seeds*, os resultados são melhores quando comparados ao resultado utilizado pela empresa atualmente, apesar de gastar um pouco mais de tempo. Não obstante, deve-se destacar que esses métodos são automatizados.

5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O objetivo desse trabalho, que era propor uma nova estratégia para solucionar o problema de roteamento de embarcações de apoio marítimo, de forma automatizada e mais econômica, em tempo real, foi alcançado. E dada a complexidade computacional do problema, a estratégia escolhida foi a de primeiro clusterizar as unidades marítimas de forma heurística, e depois, então, roteá-las de forma exata.

As heurísticas utilizadas, algoritmo de varredura e de *seeds*, que levaram em consideração as restrições de capacidade dos barcos formaram clusters com no máximo 15 UMs de cada vez, em um total de cinco clusters, abrangendo assim todo o problema.

Posteriormente, a aplicação do algoritmo exato aos clusters formados por essas heurísticas, levou em conta, além das capacidades dos barcos, o dever de servir dentro das janelas de tempo para atendimento às UMs.

A primeira heurística de clusterização desenvolvida, que foi a de varredura, apresentou uma redução pequena em relação a solução atual da empresa. Quando comparada a aplicação direta do método exato aos clusters atuais da empresa houve uma piora em relação a distância e o tempo totais.

Já a segunda heurística de clusterização, por "*seeds*", apresentou soluções significativamente melhores do que as demais soluções em relação a distância, quando aplicada em conjunto com o método exato de roteirização e as janelas de tempo.

Conclui-se, então, que a aplicação automatizada do algoritmo de clusterização por *seeds*, agregado ao método exato para resolução do problema de roteamento de veículos, foi de grande importância para a perspectiva de minimização de custos relacionada ao transporte marítimo de carga dessa empresa, revelando boas soluções dentro do tempo previsto para a solução, e, por fim, mas não menos importante para empresa, sem trazer grandes alterações aos atendimentos realizados atualmente.

Com relação a sugestões para trabalhos futuros, dentro da perspectiva de tratar o problema com o mesmo escopo híbrido clusterização + roteirização, uma sugestão para a parte de roteirização é o fortalecimento do politopo do modelo exato, uma vez que se constatou que a dificuldade maior está na geração de bons limitantes duais. Sendo assim, uma melhoria na formulação, com a inserção de novos cortes válidos seria interessante para fechar o gap de dualidade mais rapidamente, e favorecer o aumento de unidades em cada cluster.

Uma sugestão para a parte de clusterização seria melhorar o algoritmo de clusterização por “seeds”, agregando, por exemplo, conceitos de Busca Tabu. Pode-se, ainda, testar uma abordagem via meta-heurísticas para essa parte de clusterização.

Em termos de abordagem mais completa do problema, a programação das atividades do porto aproximaria ainda mais a modelagem da realidade. Desse modo o problema seria tratado por completo, desde o porto até as unidades marítimas, lembrando, porém, que as dificuldades computacionais aumentariam bastante, pois teria que se abordar essa programação (*scheduling*).

Referências Bibliográficas

- Chaves A.A. e Lorena L.A.N.** (2010), “Clustering search algorithm for the capacitated centered clustering problem”, *Computers and Operations Research*. Vol. 37, Issue 3pp.552–558
- Cordeau J.F., Laporte G., Savelsbergh M.W.P., Vigo D.** (2006), “Vehicle routing” *Transportation, handbooks in operations research and management science*, Vol.14, pp.367-428.
- Desaulniers, G., Desrosiers, J., Solomon, M. M.** (2005) “Column generation”, in Kallehauge B., Larsen J., Madsen O.B. G., and Solomon M. M. (eds), *Vehicle Routing Problem with Time Windows*, Springer, NY, XV, pp. 67-98.
- Gendreau M., Bräysy O.** (2005) , “Vehicle routing problem with time windows, part I: route construction and local search algorithms” , *Transportation science*, vol.39 ,no. 1 ,pp.104-118
- Gillett, B., and Miller, L.** (1974), "A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem", *Operations Research* 22, 340-349.
- Guerra L., Murino T. and Romano E.** (2007) “A heuristic algorithm for the constrained location - routing problem” *International journal of systems applications, engineering & development*, Issue4, Volume1, pp.146-154.
- Koskoidis Y.A. and Powell W.B.** (1992) “Clustering algorithms for consolidation of customer orders into vehicle shipments”, *Transpn. Rex-B*. Vol.268, No.5, pp.365-379.
- Laporte G.**, (2009) “Fifty Years of Vehicle Routing”, *Transportation Science* Vol. 43, No. 4, pp. 408–416.
- Laporte G., Osman I.H.** ,(1995) “Routing problems: A bibliography”, *Annals of Operations Research* 61, pp. 227-262.
- Laporte G., Noberty. (1987) “Exact algorithms for the vehicle routing problem”, *Discrete Applied Mathematics*, pp. 147-184.
- Longhi R. P** (2014),” Clusterização de unidades offshore para o roteamento de embarcações de Suprimento”, Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Lopes P.H.M.**, (2011) “Uma solução para o problema de roteamento de embarcações de apoio “marítimas” através da metaheurística RTR”, Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- MacQueen, J.B.** (1967), "Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations," *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1, 281 -297.
- Mulvey J.M., Beck M.P.** (1984) “Solving capacitated clustering problems”, *European Journal of Operational Research* 18 pp.339-348.
- Toth, P., Vigo, D.** (2002), “The Vehicle Routing Problem”, *SIAM*, 367 pp.