

APLICAÇÃO DE HEURÍSTICAS DE ROTEAMENTO PARA O DIMENSIONAMENTO DE
UMA FROTA DE TRANSPORTE MARÍTIMO

Marco Antonio Brinati	}	CEPEN/USP - Centro de Estudos e Pes
Rui Carlos Botter		quisas - Departamento de Engenharia
José Roberto Romeu Roque		Naval - Escola Politécnica da Uni-
Mario Tvrzsky de Gouvea		versidade de São Paulo
Ricardo Lima de Souza	}	PETROBRÁS
Paulo Roberto Buarque Carneiro		

RESUMO

O artigo mostra a utilização de técnicas heurísticas de roteamen to para dimensionamento de um sistema de transporte marítimo de passa geiros para as plataformas de petróleo da bacia de Campos. Na parte inicial, apresenta-se a descrição do problema de transporte e a mo delagem da demanda para o dimensionamento da frota e mostra-se que o tamanho da frota é um subproduto da solução do problema de rotea mento das embarcações. São descritas, a seguir, as heurísticas de roteamento empregadas e um procedimento de melhoria das soluções ob tidas. São apresentados e analisados alguns dos principais resulta dos obtidos.

ABSTRACT

This paper shows the use of vehicle routing heuristics in the design of a vessel fleet for passenger transportation to the offshore platforms of Campos basin. In the first part, the transportation problem is specified and the demand model for fleet size determination is presented. One shows that the fleet size is a byproduct of the vehicle routing problem solution. Then, some routing heuristics

and an improvement algorithm are presented. Finally, some of the main results are shown and analyzed.

1 - INTRODUÇÃO

Atualmente o transporte de passageiros para as plataformas da bacia de Campos é feito de forma preponderante por helicópteros. Ao abrigo do Convênio PETROBRÁS-USP, foi desenvolvido um projeto com o propósito de providenciar alternativas de transporte marítimo que sejam, ao mesmo tempo, atrativas do ponto de vista de desempenho técnico e eficientes do ponto de vista econômico.

O objetivo deste artigo é mostrar uma metodologia desenvolvida para o dimensionamento de uma frota de embarcações que atenda a demanda de transporte de passageiros para as plataformas da bacia de Campos. O ponto de partida passa pela identificação das características essenciais do padrão de demanda, seguido da elaboração de um modelo que represente tal processo. Mostra-se, após a modelagem da demanda, que o dimensionamento da frota está estreitamente imbricado com a definição das rotas (roteiros) das embarcações para atendimento das plataformas. Em função das dificuldades computacionais para obtenção de soluções exatas, a alternativa é a utilização de procedimentos heurísticos e, em virtude da incerteza sobre o mais adequado para este caso específico, três deles são escolhidos e detalhados; também é apresentado um procedimento de pós-otimização para dar mais potencialidade à sistemática proposta.

2 - MODELAGEM DA DEMANDA E DIMENSIONAMENTO DA FROTA

A demanda de transporte que se pretende atender é aquela proveniente da substituição periódica das equipes de trabalho nas platafor

mas. Em cada plataforma o trabalho é realizado em dois turnos, por equipes que se revezam a cada 12 horas. Por outro lado, cada equipe alterna, em sua grande maioria, 14 dias de trabalho com 14 dias de folga e, a cada semana, é substituída a equipe de um dos turnos.

Portanto, admitindo-se que todas as quatro equipes de trabalho de uma plataforma tenham o mesmo número de funcionários, a demanda de transporte decorrente da substituição destas equipes é periódica com um ciclo de 7 dias. Em cada período de uma semana, todas as plataformas devem ser atendidas.

São adotadas ainda duas outras premissas:

- i) todos os dias da semana são elegíveis para troca das equipes de trabalho;
- ii) é possível escolher inicialmente qualquer dia da semana para substituição da equipe de trabalho em qualquer plataforma. (É lógico que a seguir o atendimento se repete a cada 7 dias).

Concluída a caracterização da demanda, a análise do problema de dimensionamento da frota revela que a sua solução deve ser precedida pela resolução do problema de roteamento das embarcações. De fato, especificada uma embarcação com dadas capacidade (número de passageiros) e velocidade, o passo inicial é determinar, pela solução do problema de roteamento, o número de viagens semanais necessárias (e respectivas rotas) para atendimento da demanda; seja N_v o número de viagens. Conclui-se, que o número de embarcações da frota (em operação), N_{eo} , deve ser igual ao menor inteiro maior ou igual a $N_v/7$. Em notação matemática, $N_{eo} = \langle N_v/7 \rangle$.

Para definir precisamente o tamanho da frota resta ainda considerar a restrição imposta nos períodos em que as embarcações estão em reparo ou manutenção. Em tais situações, por decisão da PETROBRÁS, a frota deve ter condição de atender toda a demanda com uma embarcação a menos. O tratamento desta questão não será mostrado neste ar-

tigo.

Portanto, o dimensionamento da frota está centrado na definição do número de viagens semanais necessárias ao atendimento da demanda de transporte o problema de roteamento das embarcações se transforma no núcleo do dimensionamento da frota.

Adota-se, para efeito de dimensionamento da frota, a hipótese de que cada embarcação faz apenas uma viagem diária.

Convém fazer ainda alguns comentários. Se, em lugar de 7 dias, a PETROBRÁS tivesse optado por apenas 5 dias por semana para a troca das equipes de trabalho na plataforma, a solução do problema de roteamento permaneceria a mesma e só haveria modificação na dimensão da frota. Isto é, o trabalho realmente preponderante não seria modificado, mas apenas o cálculo complementar.

Os procedimentos heurísticos, que serão apresentados mais adiante para roteamento dos veículos, devem ser encarados sob dois enfoques diferentes. De um lado, a nível estratégico, eles são empregados para o dimensionamento da frota; por outro, a nível operacional, depois que o sistema de transporte marítimo tiver sido implantado, eles podem ser utilizados para a definição de novas soluções quando houver mudança de demanda, provocada por modificação no número de plataformas ou de suas posições ou do número de integrantes das equipes de trabalho.

3 - DIFICULDADES PRÁTICAS DOS MÉTODOS EXATOS

O problema de roteamento de veículos pode ser representado por diversos modelos de programação inteira, que, ao considerar os diversos aspectos do problema, apresentam alguma superposição ou um certo interrelacionamento. No entanto, a maioria desses modelos são de acordo com Magnanti (1) elaborações ou modificações de três tra-

tamentos básicos: formulação baseada no fluxo de veículos, formulação baseada no fluxo de mercadorias e formulação de partição de conjuntos.

Quando examinadas como modelos genéricos de programação linear inteira ou mista, as três formulações básicas do problema de roteamento de veículos apresentam limitações práticas bastante severas. O tamanho de qualquer um desses modelos excede em muito a capacidade dos mais sofisticados códigos de programação linear inteira. Por exemplo, uma aplicação com 40 pontos de demanda e 10 veículos, equivalente à configuração atual de demanda na bacia de Campos, utilizando a formulação de fluxo de veículos apresentada acima, dá origem a um problema de programação inteira com 16.400 variáveis inteiras e 480 restrições, sem incluir as restrições para evitar subrotas. Com as outras formulações básicas, a dimensão desse problema também é excessiva para os códigos existentes de programação inteira.

Em virtude das dificuldades práticas no emprego de métodos exatos para a resolução do problema de roteamento de veículos, um grande número de técnicas heurísticas têm sido desenvolvidas. Na próxima seção serão apresentadas três heurísticas selecionadas e implementadas para determinação do roteamento das embarcações a serem empregadas no transporte de passageiros para as plataformas da bacia de Campos.

4 - MÉTODOS HEURÍSTICOS

Tendo em vista que os procedimentos heurísticos não asseguram a obtenção de uma solução ótima e que também não há uma heurística que seja certamente melhor que outras em qualquer problema, quatro procedimentos foram selecionados na resolução do problema de roteamento das embarcações para as plataformas da bacia de Campos. Três

delas, implementadas em programa para microcomputadores, são apresentadas adiante. A quarta heurística, adaptação da técnica de designação generalizada de Fisher e Jaikumar, só foi implementada em "main frame", em virtude de não se dispor de um "software" de programação linear inteira de maior parte para microcomputadores. Como, além disso, essa heurística não incorpora a restrição de tempo de viagem, ela foi utilizada apenas em casos isolados para aferir a qualidade da melhor solução gerada pelas outras heurísticas.

4.1 Técnica de varredura ou "sweep"

A primeira heurística pertence à classe de agrupar primeiro e roteirizar depois. O agrupamento é feito através do procedimento de varredura, que consiste em girar em dado sentido uma semi-reta com origem no depósito central (base). Sempre que a inclusão de um novo ponto implica a violação da restrição de capacidade ou do tempo máximo de viagem do veículo, os nós varridos até então passam a constituir um grupo de nós a ser servido por um dado veículo. Repete-se, a partir do nó excluído, a rotação da semi-reta, formando-se assim, os diversos grupos de nós.

Identificando o conjunto de nós que será atendido por um dado veículo, a obtenção do roteamento pode ser realizada por qualquer um dos inúmeros algoritmos elaborados para solução do problema do caixeiro viajante (Convém observar que a viabilidade do roteamento ótimo para esse conjunto de nós já ficou garantida na parte inicial da heurística). Optou-se, neste caso, pela utilização de um procedimento composto, constituído pelo emprego sucessivo dos procedimentos:

(i) inserção do vizinho mais próximo;

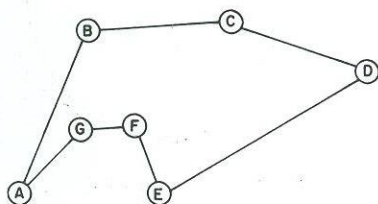
(ii) algoritmo 2-opt

O primeiro é um procedimento de construção de um roteiro para o

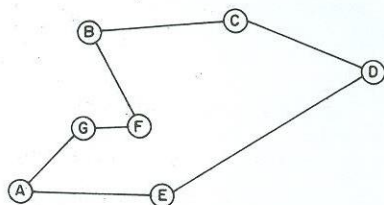
caixeiro viajante, e o segundo um procedimento de melhoria. Como o algoritmo 2-opt é utilizado também na heurística da rota gigante e no procedimento de pós-otimização, apresenta-se a seguir uma breve descrição do mesmo.

O algoritmo 2-opt é um procedimento de melhoria no qual procura-se reduzir o comprimento da rota atual pela substituição de dois de seus arcos, conforme ilustrado na Figura 4.1. Convém observar que a troca é bem definida a cada passo. Quando se analisa a retirada dos arcos AB e EF da rota atual, na figura 4.1a, a alternativa é introduzir os arcos AE e BF, pois a inclusão do arco AF conduz a uma subrota (a ligar A a B reproduz a rota existente). Cabe assinalar ainda que o procedimento requer simetria, já que o sentido de movimento nos arcos BC, CD e DE é invertido.

Este tipo de procedimento termina em um mínimo local; isto é, não é possível melhorar a rota pela substituição de dois arcos.



(a) Rota atual



(b) Rota modificada

Figura 4.1 - Ilustração da substituição de dois arcos no algoritmo 2-opt.

4.2 Método de economia de Clarke & Wright

O método de Clarke e Wright é um procedimento extremamente simples e flexível, que tem sido extensivamente utilizado para resolu-

ver, de maneira bastante eficiente, o problema de roteamento de veículos.

Seja 0 o índice do depósito central (base) e n o número de pontos de demanda. Pelo método de Clarke e Wright, admite-se que, inicialmente, cada veículo serve um único ponto, ou seja, no início há n rotas do tipo $0 - i - 0$. A seguir, procura-se juntar duas rotas em uma, eliminando-se, assim, um veículo. A economia s_{ij} obtida ao formar a rota $0 - i - j - 0$ é, conforme se constata na figura 4.2:

$$s_{ij} = c_{0i} + c_{j0} - c_{ij} \quad (4.1)$$

onde c_{rs} é o custo para um veículo fazer o trajeto entre os nós r e s . (Admite-se que todos os veículos sejam iguais). Para que duas rotas possam ser combinadas em uma única, é necessário que as restrições de capacidade e tempo máximo de viagem sejam satisfeitas.

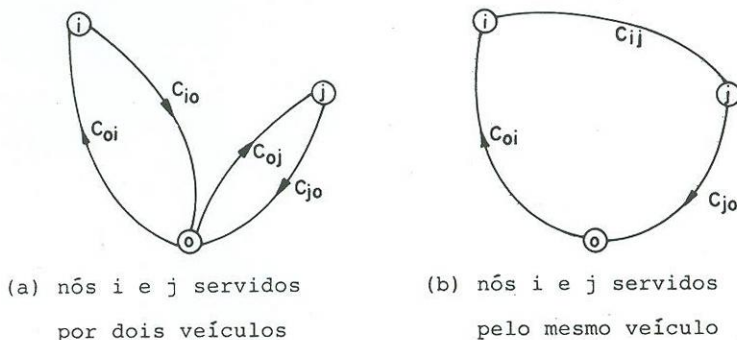


Figura 4.2 - Economia obtida pela combinação de duas rotas individuais em uma única rota.

A medida que se prossegue na aplicação do método, vão aparecendo rotas com diversos nós e os nós ligados à base são chamados de pontos extremos. Se i e j são pontos extremos de duas rotas diferentes, a economia de juntar estas rotas também é igual a s_{ij} , dado pela expressão (4.1).

O método de Clarke e Wright pode ser decomposto nos seguintes passos.

Passo 1 Calcular a matriz das economias s_{ij} .

Passo 2 Ordenar decrescentemente as economias s_{ij} .

Passo 3 Para o maior dos s_{ij} ainda não considerado, juntar as subrotas contendo os nós i e j se eles são nós extremos de rotas diferentes e se as restrições de capacidade do veículo e de tempo de viagem são satisfeitas.

Passo 4 Repetir o passo 3 até esgotar todos os s_{ij} .

Várias modificações têm sido incorporadas ao método básico de Clarke e Wright. Uma delas, adotada neste trabalho, consiste em ponderar em (4.1) o termo c_{ij} por um parâmetro γ , de modo que a economia s_{ij} passa a ser calculada por:

$$s_{ij} = c_{oi} + c_{jo} - \gamma c_{ij} \quad (4.2)$$

Variando o valor de γ é possível colocar maior ou menor ênfase no custo de transporte entre dois nós i e j , dependendo de suas posições relativas ao depósito central (base). Com a alteração do valor de γ , diversas soluções podem ser obtidas e a melhor delas será selecionada:

4.3 Partição múltipla da rota gigante

Este algoritmo, devido a Golden et alii [2], pertence à classe de rotear primeiro e agrupar depois. Inicialmente, constrói-se uma rota que visita todos os clientes. A seguir, esta rota é particionada em subrotas, compostas de segmentos contíguos da rota original, tendo cada uma de suas extremidades ligada ao depósito central (base). Cada uma dessas subrotas satisfaz as restrições do problema.

Para construção da rota gigante, passo correspondente à solução

do problema do caixeiro viajante, utiliza-se o procedimento 2-opt , já descrito anteriormente.

Para descrição do procedimento de partição, seja $0 - s(1) - s(2) - s(3) \dots - s(n) - 0$ a rota gigante gerada. Define-se distância ou custo $c(k,m)$ entre dois nós $s(k)$ e $s(m)$, $k < m$, como sendo a distância total de uma rota viável para atender os nós $s(k)$, $s(k+1), \dots, s(m-1)$.

Ou seja:

$$c(k,m) = \begin{cases} d_{0,s(k)} + \sum_{r=k}^{m-2} d_{s(r),s(r+1)} + d_{s(m-1),0} \\ \text{se } \begin{cases} \sum_{i=k}^{m-1} d_{s(i)} \leq k_v \\ \frac{c(k,m)}{v} + \sum_{i=r}^{m-1} t_{s(i)} \leq T_v \end{cases} \\ , \text{ em caso contrário} \end{cases}$$

onde: $d_{s(r), s(r+1)}$ é a distância entre os nós $s(r)$ e $s(r+1)$;

$d_{s(i)}$ é a demanda do nó $s(i)$;

k_v é a capacidade do veículo v , admitida uniforme;

v é a velocidade média do veículo;

$t_{s(i)}$ é o tempo de permanência do veículo no nó $s(i)$;

T_v é o tempo máximo de viagem

Dessa forma $c(k, n+1)$ representa a distância no arco ligando o nó k ao depósito.

Uma vez definidas as distâncias $c(k,m)$, determina-se a distância mínima entre o primeiro nó da rota gigante $s(1)$ e a base. Se a solução do problema de distância mínima consistir de p arcos $(s(1), s(i_1)), (s(i_1), s(i_2)), (s(i_2), s(i_3)), \dots, (s(i_{p-1}), s(0))$, então a partição da rota gigante consistirá das seguintes p subrotas:

$$0 - s(1) - s(2) \dots - s(i_1 - 1) - 0, \quad 0 - s(i_2) - s(i_2 + 1) \dots$$

$$s(i_3 - i_1) - 0, \dots, 0 - s(i_{p-1}) \dots s(n) - 0.$$

Para dar maior flexibilidade ao algoritmo, permitindo a avaliação de partições múltiplas, introduz-se a seguinte variante. Constrói-se uma rota gigante, sem incluir a base $s(1), s(2), \dots, s(n)$. Considera-se, a seguir, a sequência de nós $s(1)-s(2)-\dots-s(n)-s'(n+1)-s(n+2)-\dots-s(n+M)$, onde $s(n+1)$ é uma duplicação do nó i para $i=1, \dots, M$ com M definido pela relação.

$$\sum_{n=1}^{M-1} d_s(r) < k_v \leq \sum_{n=1}^M d_s(r) \quad (4.4)$$

Define-se S_ℓ como sendo a distância mínima entre os nós $s(i)$ e $s(n+1)$, $i = 1 \dots, M$. Se $S_\ell = \min_i S_i$, $j = 1, \dots, M$ a partição ℓ é a partição ótima para a rota gigante construída.

5 - PROCEDIMENTO DE MELHORIA

Desde que não se garante a otimalidade do roteamento obtido pelas técnicas heurísticas, é recomendável aplicar um procedimento de melhoria (ou incorretamente de pós otimização). Uma alternativa é aperfeiçoar cada rota, mantendo o mesmo agrupamento de nós por veículo; outra, mais complexa, porém mais poderosa, deve permitir que se reagrupem os nós. Um desses procedimentos elaborado com base no algoritmo 2-opt é exposto a seguir.

Inicialmente é necessário criar uma rota gigante a partir do roteamento obtido. A figura 5.1 ilustra este procedimento para um caso simples. Se há p rotas, são criadas p cópias do depósito (representadas na figura 5.1b por $(c_1, c_2, c_3 \dots)$). A rota de um veículo tem origem na cópia de um depósito e termina na cópia consecutiva (consecutivo de $c(p)$ é $c(1)$). A distância entre duas cópias quaisquer do depósito é nula.

Uma vez obtida a rota gigante, examina-se se a substituição de dois arcos da rota por outro par produz uma redução do custo total,

sendo necessário considerar agora as restrições de capacidade e tempo de viagem do veículo. Quando, após uma troca, duas cópias do de sito se tornam adjacentes na rota gigante, obtém-se a redução de um veículo.

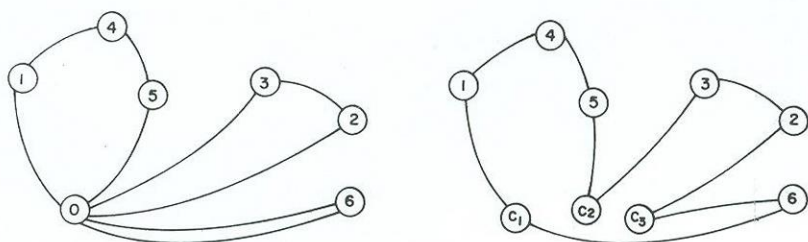


Figura 5.1 - Formação de rota gigante a partir de um roteamento.

6 - RESULTADOS OBTIDOS

As variáveis de decisão utilizados para o dimensionamento da frota em cada cenário de demanda de transporte são:

1 - capacidade de transporte	}	relativas a embarcação
2 - velocidade		
3 - tipo		
4 - material de construção	}	relativas à configuração de operação.
5 - tipo de transbordo		
6 - tempo máximo de viagem		

Neste artigo serão tratados apenas os aspectos operacionais do problema e, por isto, não serão analisadas as influências do tipo e material de construção da embarcação. Na tabela 6.1 são mostrados os resultados obtidos para diferentes valores das variáveis de decisão em dois cenários de demanda. [O cenário 2 corresponde à situação após a implantação do polo Nordeste e o 3 à introdução das plataformas de Marlim e Albacora]. Da análise dos resultados, são

Tabela 6.1 - Influência das variáveis de decisão sobre o número de viagens semanais e tamanho da frota.

Cenário	Tempo Máximo de Viagem (Horas)	Velocidade (nós)	Capacidade (Nº de passageiros)	Transbordo por Cesto(1)		Transbordo por rampa(2)	
				Nº de Viagens semanais	Nº de Emb. da frota em oper.	Nº de Viagens semanais	Nº de Emb. da frota em oper.
2	9	25	200	23	4	17	3
			300	23	4	11	2
			400	23	4	9	2
	12	25	500	23	4	8	2
			200	17	3	17	3
			300	12	2	11	2
	12	25	400	11	2	8	2
			500	11	2	7	1
			200	19	3	17	3
	12	20	300	15	3	11	2
			400	15	3	8	2
			500	15	3	7	1
3	10	25	200	34	5	23	4
			300	31	5	15	3
			400	31	5	11	2
			500	31	5	10	2
	12	25	200	23	4	23	4
			300	17	3	15	3
			400	16	3	11	2
			500	16	3	9	2
	12	20	200	34	5	23	4
			300	31	5	15	3
			400	31	5	12	2
			500	31	5	10	2

1. Taxa de transferência nos dois sentidos - 60 passageiros/hora
2. Taxa de transferência nos dois sentidos - 360 passageiros/hora

destacados a seguir os principais pontos.

1. Quanto mais severa a restrição do tempo de viagem e menor a taxa de transbordo, menos sensível é o número de viagens semanais (e, em consequência, o tamanho da frota) com relação à capacidade da embarcação. Em alguns casos não há redução do número de viagens, quando se aumenta a capacidade. (A explicação para o fato é que não adianta prover capacidade adicional de transporte para atender um número maior de plataformas, pois, a embarcação precisa retornar à base, após de atender as primeiras plataformas). Em outros casos, a redução do número de viagens pode ser insuficiente para que se consiga a redução no tamanho da frota. Nesta situação, a única vantagem consiste na redução da distância semanal percorrida, cujo reflexo econômico principal é a diminuição das despesas com combustível. Quando, com o aumento da capacidade da embarcação, há redução no tamanho da frota, as vantagens econômicas são bem maiores, já que são afetados o custo de capital e componentes do custo operacional que lhe são proporcionais, como seguro e manutenção.
2. Quanto mais frouxa a restrição de tempo de viagem e mais rápido o processo de transbordo, menos sensível é a solução do problema à velocidade da embarcação. Nesta situação, a restrição atuante no roteamento das embarcações é a capacidade da embarcação.
3. Para a faixa de variação adotada, a influência do tempo máximo de viagem somente é significativa quando a transferência dos passageiros para as plataformas se faz por cesto. No caso de transbordo por rampa, o tempo de parada da embarcação junto às plataformas é uma fração bem pequena do tempo total de viagem. Desta forma, quando se torna menos severa a restrição superior para o tempo de viagem, o benefício se restringe ao atendimento das plataformas mais distantes da base. No caso de transbordo

por cesto; a ampliação do tempo máximo acaba viabilizando o atendimento numa mesma viagem de plataformas que estão próximas entre si.

7 - BIBLIOGRAFIA

1. MAGNANTI, T.L. "Combinatorial Optimization and Fleet Planning - Perspectives and Prospects". Networks, Vol. 11, 179-213, 1981.
2. GOLDEN, B.; ASSAD, A.; LEVY, L.; & GHEYSENS, F.; "The Fleet Size and Mix Routing Problem", Comput. & Op. Res. - Vol. 11, 49-65, 1984.
3. FISHER, M.L. & JAIKUMAR, R., "A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing", Networks, Vol. 11, 109-124, 1981.