



ISSN 2175-6295 Rio de Janeiro- Brasil, 12 e 13 de agosto de 2010

HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE DE PESSOAS NA BACIA DE CAMPOS – PETROBRAS

Marcos Tayguara dos Santos Aranha
PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.
Rua Governador Roberto Silveira, 148,
Centro, Macaé, RJ, 27910-000, Brasil.
marcos_tayguara@yahoo.com.br

Fermín Alfredo Tang Montané
Universidade Candido Mendes – UCAM-Campos.
Rua Anita Peçanha, 100, Parque São Caetano,
Campos dos Goytacazes, RJ, 28040-320, Brasil.
tang@ucam-campos.br

RESUMO

Neste artigo, é investigado o PTRANSBC – Problema de Transporte Terrestre de Pessoas da Bacia de Campos – PETROBRAS, que consiste no atendimento das solicitações de viagens terrestres. Os objetivos são aprimorar o uso da frota de veículos e reduzir os custos de transporte. A metodologia proposta visa o uso homogêneo da frota sujeito a restrições de horários e localização. O PTRANSBC é decomposto em três subproblemas: agrupamento de solicitações, alocação de veículos e roteamento de veículos, que são resolvidos utilizando modelos de programação matemática e algoritmos heurísticos. Foram utilizados dados referentes a 13 dias de programação, num total de 3223 solicitações e com uma frota de 216 veículos, entre carros e vans. Os resultados obtidos mostraram redução de 46,4% no número total de viagens realizadas, redução de 17,3% no número total de veículos utilizados e melhoria de 86,5% na ocupação média dos veículos.

PALAVRAS CHAVE. Agrupamento de Solicitações. Problema de Alocação de Veículos. Problema de Roteamento de Veículos. Logística e Transportes.

ABSTRACT

In this article, PTRANSBC is investigated - Problem of On shore Person Transport of Campos' Basin - PETROBRAS, that consists of the attendance of the on shore transportation requests. The objectives are to improve the use of the fleet of vehicles and to reduce transportation costs. The proposed methodology seeks the homogeneous use of the fleet subject to time and distance restrictions. PTRANSBC is decomposed in three sub problems: requests grouping, vehicles allocation and vehicles routing, that are resolved using models of mathematical programming and heuristic algorithms. Real data from 13 days of programming were used, considering 3223 requests and a fleet of 216 vehicles, including cars and vans. The obtained results showed a reduction of 46.4% in the number of accomplished trips, a reduction of 17.3% in the number of vehicles used and an improvement of 86.5% in average vehicle's occupation.

KEYWORDS. Request's Grouping. Vehicle Allocation Problem. Vehicle Routing Problem. Logistics and Transportation.

1. Introdução

Como uma das maiores empresas de energia do Brasil e do mundo, a Petrobras tem buscado, ao longo dos anos, implementar medidas de otimização de custos e disciplina de capital, num cenário complexo que envolve crises econômicas, conflitos de interesses, nacionalismos, variação de preço do petróleo, dinâmicas de oferta e demanda, recursos finitos, entre outros fatores que tem motivado as empresas, de um modo geral, a direcionar sua gestão no sentido da busca constante de redução de custos. Nesse contexto, a Gerência Geral dos Serviços Compartilhados da Bacia de Campos, que compõe a Diretoria de Serviços da Petrobras e é responsável pelo Serviço de Transporte Terrestre de Pessoas em Macaé e regiões próximas, promoveu a realização deste trabalho.

Diversos problemas associados à Logística de Transporte têm sido abordados em estudos acadêmicos: Caldas e Santos (2008) realizaram um estudo sobre heurísticas para roteamento de veículos na distribuição de bebidas em regiões urbanas; Rodrigues (2008) apresentou uma aplicação da metaheurística colônia de formigas no transporte de empregados da Itaipu Binacional; Vitor *et al.* (2009) apresentaram um estudo sobre heurísticas para otimizar o roteamento no setor de vendas de uma empresa agrícola.

Na Bacia de Campos, atuam aproximadamente 62 mil profissionais distribuídos nas unidades de Imbetiba, Parque de Tubos, Terminal de Cabiúnas e plataformas marítimas. A média mensal de solicitações de deslocamento no período de Janeiro/2008 a Fevereiro/2009, foi estimada em 8 mil, incluindo traslados entre municípios, principalmente o Rio de Janeiro, além de cidades vizinhas, tais como Campos dos Goytacazes e Rio das Ostras.

A gestão deste serviço de transporte é feita através do Sistema de Transportes Gerais – STG, aplicativo que recebe as solicitações de transporte de toda Bacia de Campos e permite que os programadores façam as escolhas dos veículos para atendimento às solicitações de viagem. O STG não possui componentes de otimização, nem a informação de localização do veículo e nem dados da escala do motorista: estes controles são feitos pelos programadores através de listas e planilhas. Tais fatos dificultam a decisão do programador em escolher os melhores veículos para atendimento da demanda, já que existem vários critérios de decisão e a demanda é elevada.

A programação feita desta forma tem trazido diversos problemas para o transporte e contribuído para reduzir a qualidade e confiança no serviço prestado aos usuários:

- a) utilização heterogênea da frota, fato que têm provocado o pagamento de km excedente, em virtude das franquias contratadas;
- b) realização de atendimentos individuais para rotas iguais ou semelhantes, o que tem gerado um número significativo de vagas ociosas nos veículos e tem dificultado o atendimento da demanda com a frota disponível;
- c) realização de atendimentos com motoristas no último dia da escala em viagens distantes de Macaé, fato que têm provocado o pagamento de horas extras;
- d) não existência de boas rotas para os atendimentos, fato que tem provocado insatisfação com o serviço em função de horários de atendimento insatisfatórios, além de contribuir para o pagamento de km excedente.

O presente trabalho faz uma contribuição para resolver o problema de atendimento de solicitações de deslocamento terrestre na Bacia de Campos. A abordagem proposta define e estuda o problema denominado PTRANSBC – Problema de Transporte Terrestre de Pessoas da Bacia de Campos. Entre os objetivos visados pela abordagem proposta temos: utilização homogênea da frota disponível; aumento da taxa de ocupação dos veículos; redução do pagamento de horas extras; redução do pagamento de km excedente; melhoria da qualidade do serviço de transporte prestado.

O artigo está organizado em cinco seções. Na seção 2 é apresentada a Descrição do PTRANSBC. Na seção 3 é apresentada a Metodologia Proposta. Na seção 4 são apresentados os Testes e Resultados Computacionais. Por fim, na seção 5 são apresentadas as Conclusões e Trabalhos Futuros.

2. Descrição do PTRANSBC

Nesta seção descrevem-se os detalhes do Problema do Transporte Terrestre de Pessoas da Bacia de Campos (PTRANSBC) abordado no presente estudo. Na seção 2.1, descreve-se a Dinâmica atual da programação de veículos e na seção 2.2 os componentes do PTRANSBC.

2.1. Dinâmica atual da programação de veículos

Todas as solicitações de viagem são registradas no STG. Para o atendimento das solicitações, existe uma equipe de profissionais dedicados à tarefa de programação dos veículos, composta por 16 profissionais, que atua no centro de programação localizado em Macaé. Cada programador é responsável por uma média de 10 a 15 veículos.

As tarefas de programação foram divididas em dois tipos: programação do dia atual e do dia seguinte. O planejamento da programação, tanto do dia como do dia seguinte, é feito no início de cada dia, sendo que as novas solicitações que chegam ao longo do dia são incorporadas ao planejamento já realizado.

Cada programador visualiza no STG um subconjunto de solicitações e decide quais solicitações programar, de acordo com origens, destinos, horários, antecedência do pedido e veículos da sua responsabilidade. A partir da análise das solicitações, o programador decide quais solicitações podem ser programadas num mesmo veículo, de acordo com a quilometragem no mês, regime, capacidade, escala do motorista e localização do veículo. Os programadores escolhem, dentro da lista geral de veículos, aquele que melhor se adequar às solicitações selecionadas. Não existe garantia de que a escolha feita pelo programador seja viável em termos de localização e horário disponível do veículo, e mesmo sendo viável, que seja uma boa escolha.

2.2. Componentes do PTRANSBC

A frota de veículos disponível é dividida em carros de gerência e de *pool*, sendo apenas os carros de *pool* objeto do presente estudo. Os veículos de *pool* operam de acordo com o regime de trabalho que é caracterizado pelo horário: 8h (7h às 17h), 12h (7h às 20h) e 24h; e pela frequência: todos os dias (T.D.) e apenas dias úteis (D.U). No *pool*, está disponível um total de 216 veículos. Existem 170 veículos de passeio que podem transportar até três pessoas, e 46 vans com capacidade de até dezesseis passageiros. As características da frota de veículos são detalhadas na Figura 1, indicando-se o regime de trabalho, a quantidade de veículos, a franquia mensal em km e a utilização de escala dos motoristas.

Modelo do veículo	8h	12h	24h	DU	TD	Nº veículos	Franquia mensal	Escala?
PARATI	X			X		9	3.000 km	N
PARATI	X			X		10	6.000 km	N
POLO SEDAN 1.6		X		X		89	6.000 km	N
POLO SEDAN 1.6		X			X	40	6.000 km	S
PARATI		X			X	10	6.000 km	S
PARATI			X		X	3	3.000 km	S
POLO SEDAN 1.6			X		X	9	6.000 km	S
VAN-MASTER -16 PAX		X		X		16	3.000 km	N
VAN MASTER -16 PAX		X			X	21	3.000 km	S
VAN MASTER -16 PAX			X		X	9	3.000 km	S

Figura 1 – Características da frota de veículos de *pool*.

Deve ser evitado que os veículos ultrapassem a franquia contratada de quilômetros, pois tal fato acarretará no pagamento de km excedente.

Além das restrições impostas pelo regime de trabalho adotado para a frota de veículos é preciso considerar as restrições impostas pela escala dos motoristas. Os motoristas que trabalham nos dias úteis (T.D.) não possuem escala. Já os que trabalham todos os dias utilizam o esquema 4 x 2: trabalham 4 dias e folgam 2 dias. Este esquema é adotado por motoristas de veículos de 12h e de 24h, conforme a Figura 1.

A Figura 2 ilustra, com um exemplo, a escala de motoristas no caso com dois veículos. No exemplo, 'M' indica motorista oficial do veículo e 'F' motorista folgador (substituto do motorista oficial nos dias de folga).

Veículos/Dia	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°	15°	16°
Veículo1	M1	M1	M1	M1	F1	F1	M1	M1	M1	M1	F1	F1	M1	M1	M1	M1
Veículo2	F1	F1	M2	M2	M2	M2	F1	F1	M2	M2	M2	M2	F1	F1	M2	M2

Figura 2 – Escala de motoristas para o caso de veículos 12h T.D.

Deve ser evitado que o motorista atenda uma solicitação de viagem para fora de Macaé no último dia da escala, pois tal fato poderá acarretar o pagamento de hora-extra.

3. Metodologia Proposta

O Problema do Transporte Terrestre de Pessoas da Bacia de Campos (PTRANSBC), objeto do presente estudo, foi subdividido em três subproblemas:

- Problema de Agrupamento de Solicitações (PAS): consiste em organizar as solicitações de viagem em grupos com características semelhantes: mesma data de partida, locais de origem próximos e horários de partida semelhantes.
- Problema de Alocação das Solicitações aos Veículos (PASV): consiste em alocar veículos disponíveis às solicitações de viagem. A alocação dos veículos é realizada para cada grupo obtido na solução do subproblema anterior.
- Problema de Roteamento dos Veículos Programados (PRVP): consiste em determinar a rota de atendimento (coleta e entrega de pessoal) a ser seguida por cada veículo programado de maneira a minimizar a distância total percorrida.

O problema PAS é resolvido mediante o Algoritmo de Agrupamento de Solicitações (AAS), proposto na seção 3.1. O problema PASV é resolvido mediante o Algoritmo de Alocação de Solicitações aos Veículos por grupo (AASV), descrito na seção 3.2. Este algoritmo resolve o Modelo Matemático de Alocação por Grupo (MMAG), apresentado na seção 3.3. Para resolver o problema PRVP, é proposto o Algoritmo de Roteamento dos Veículos Programados (ARVP), descrito na seção 3.4. Os três algoritmos propostos são integrados no Algoritmo de Programação do Transporte da Bacia de Campos (APTBC), descrito na seção 3.5.

3.1. Algoritmo de Agrupamento de Solicitações (AAS)

Optou-se por agrupar as solicitações, conforme Fisher e Jaikumar (1981) e Caldas e Santos (2008). O algoritmo ASS, apresentado na Figura 3, organiza o conjunto inicial de solicitações em grupos com características compatíveis. A formação desses grupos permite que algumas solicitações do grupo utilizem um mesmo veículo, gerando um melhor aproveitamento da frota de veículos. O algoritmo ASS utiliza os seguintes dados de entrada: S – conjunto inicial de solicitações; data – data usada para filtrar as solicitações; H – limite de horário considerado para incluir horários próximos no mesmo grupo; D – distância máxima permitida em quilômetros para incluir no mesmo grupo origens próximas. Os valores *default* considerados são H = 30 min. e D = 20 km. O produto final do AAS é o conjunto de agrupamentos G.

```

1. Procedimento AAS (S, data, H, D)
2. início
3.  $S' \leftarrow \text{Filtrar}(S, \text{data})$ 
4.  $S'' \leftarrow \text{Ordenar}(S')$ 
5. para  $\forall s_0 \in S'', \forall g \in G$  faça
6.      $g \leftarrow \text{Agrupar}(s_0, H, D)$ 
7. fimpara
8. Retornar(G)
9. fim

```

Figura 3 – Algoritmo de Agrupamento de Solicitações (AAS).

O algoritmo AAS começa filtrando as solicitações (S) com base em uma data especificada (data). Depois ordena as solicitações filtradas (S') pelo horário de partida e local de origem. As solicitações filtradas e ordenadas (S'') são processadas de maneira a criar grupos de solicitações. Cada solicitação ($s_0 \in S''$) é processada com base em dois critérios. Primeiro, tenta-se colocar a solicitação em um grupo compatível por horário, usando o limite de horário especificado (H). Feito isso, avalia-se a distância para saber se a solicitação será colocada num novo grupo, usando o limite de distância especificado (D). Finalmente, o algoritmo retorna os agrupamentos gerados (G).

3.2. Algoritmo de Alocação de Solicitações aos Veículos por grupo (AASV)

Este algoritmo tem como objetivo alocar veículos disponíveis às solicitações de viagem, previamente agrupadas por horário e local de origem através do AAS. A alocação dos veículos é realizada para cada grupo. O algoritmo proposto é mostrado na Figura 4.

O algoritmo AASV utiliza os seguintes dados de entrada: G – conjunto de grupos de solicitações; V – conjunto de veículos disponíveis; hfaixa – faixa de horário usada para filtrar a lista de grupos; D – distância máxima permitida em quilômetros para alocar no mesmo veículo solicitações próximas; E – limite permitido de escala dos motoristas para realização de viagens distantes de Macaé; e rh – relaxamento das restrições de horário dos veículos. Os valores *default* considerados são $D = 20$ km, $E = 3$ e $rh = \text{falso}$. O produto final do AASV é o conjunto de alocação A.

```

1. Procedimento AASV (G, V, hfaixa, D, E, rh)
2. início
3.  $G' \leftarrow \text{Filtrar}(G, \text{hfaixa})$ 
4.  $V' \leftarrow \text{Filtrar}(G', V, \text{hfaixa})$ 
5. para  $\forall g_0 \in G', \forall v_0 \in V', \forall a_0 \in A$  faça
6.      $d \leftarrow \text{Calcular\_dist}(g_0, v_0)$ 
7.      $a_0 \leftarrow \text{MMAG}(d, D, E, rh)$ 
8.     se viável( $a_0$ ) então
9.          $V' \leftarrow \text{Atualizar}(a_0)$ 
10.    fimse
11. fimpara
12. Retornar(A)
13. fim

```

Figura 4 – Algoritmo de Alocação de Solicitações aos Veículos por grupo (AASV).

O algoritmo AASV filtra os grupos (G) de uma faixa de horário específica (hfaixa), de forma que sejam possíveis múltiplas alocações dos veículos em faixas de horário diferentes ao longo do dia. Depois filtra os veículos (V) com regime e disponibilidade (hfaixa) compatíveis

com os grupos filtrados (G'). Para cada grupo já filtrado e veículos compatíveis, calcula as distâncias entre as solicitações ($g_0 \in G'$) e veículos ($v_0 \in V'$). Em seguida, calcula a alocação de solicitações aos veículos mediante o modelo MMAG. Depois avalia a viabilidade da alocação ($a_0 \in A$), para que seja atualizada a disponibilidade dos veículos (V') para as próximas iterações. Finalmente, retorna o resultado final da alocação (A) das solicitações aos veículos.

3.3. Modelo Matemático de Alocação por Grupo (MMAG)

O modelo MMAG foi construído com base nos estudos de *bin-packing* de Cunha *et al.* (2008), onde é determinada a alocação de itens (aqui abordados como solicitações) aos *bins* (aqui abordados como veículos). O modelo MMAG proposto é apresentado na Figura 5.

Os dados de entrada são:

- n : número de veículos;
- m : número de solicitações;
- q_i : capacidade de carga (pessoas) do veículo i , $\forall i \in \{1...n\}$;
- km_i : quilometragem atual do veículo i , $\forall i \in \{1...n\}$;
- e_i : escala atual do motorista do veículo i , $e_i \in \{1,2,3,4\}$ e $\forall i \in \{1...n\}$;
- hi_i : horário inicial de expediente do veículo i , $\forall i \in \{1...n\}$;
- hf_i : horário final de expediente do veículo i , $\forall i \in \{1...n\}$;
- hs_j : horário de solicitação da viagem j , $\forall j \in \{1...m\}$;
- ex_j : indicador de viagem distante de Macaé, onde $ex_j = 1$ se a solicitação j é viagem externa e $ex_j = 0$ caso contrário, $\forall j \in \{1...m\}$;
- d_{ij} : distância (km) entre veículo i e solicitação j , $\forall i \in \{1...n\}$ e $\forall j \in \{1...m\}$;
- D : distância máxima (km) aceita para alocação de solicitações aos veículos;
- E : limite de escala dos motoristas para viagens externas, $E \in \{1,2,3,4\}$;

As variáveis de decisão são:

- $v_i = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } i \text{ é utilizado} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \forall i \in \{1...n\}$
- $vs_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a solicitação } j \text{ é alocada ao veículo } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \forall i \in \{1...n\} \text{ e } \forall j \in \{1...m\}$

Minimizar: $\sum_{i=1}^n km_i \cdot v_i$	(1)
Sujeito a:	
$\sum_{j=1}^m vs_{ij} \leq q_i \cdot v_i,$	$\forall i \in \{1...n\}$ (2)
$\sum_{i=1}^n vs_{ij} = 1,$	$\forall j \in \{1...m\}$ (3)
$hs_j \cdot vs_{ij} \geq hi_i \cdot vs_{ij},$	$\forall i \in \{1...n\} \text{ e } \forall j \in \{1...m\}$ (4)
$hs_j \cdot vs_{ij} \leq hf_i \cdot vs_{ij},$	$\forall i \in \{1...n\} \text{ e } \forall j \in \{1...m\}$ (5)
$d_{ij} \cdot vs_{ij} \leq D \cdot vs_{ij},$	$\forall i \in \{1...n\} \text{ e } \forall j \in \{1...m\}$ (6)
$e_i \cdot vs_{ij} \leq E \cdot vs_{ij},$	$\forall i \in \{1...n\}, \forall j \in \{1...m\} \text{ e } \forall ex_j = 1$ (7)
$v_i \in \{0,1\} \text{ e } vs_{ij} \in \{0,1\},$	$\forall i \in \{1...n\} \text{ e } \forall j \in \{1...m\}$ (8)

Figura 5 – Modelo Matemático de Alocação por Grupo (MMAG).

A função objetivo (1) busca minimizar o somatório das quilometragens atuais dos veículos utilizados, induzindo a escolha dos veículos menos rodados e conseqüente redução do nº de veículos alocados. As restrições (2) asseguram que a capacidade dos veículos não seja violada. As restrições (3) impõem que cada pessoa seja alocada a exatamente um veículo. As restrições (4) e (5) garantem que os horários de expediente dos veículos sejam respeitados. As restrições (6) garantem que apenas os veículos distantes a uma distância máxima D das solicitações sejam alocados. As restrições (7) asseguram que, nos casos de viagens distantes de Macaé, os veículos sejam programados dentro do limite de escala E informado ao modelo. As restrições (8) asseguram que as variáveis do modelo sejam binárias.

Foi avaliada a possibilidade de processar todos os grupos uma única vez, adaptando AASV e MMAG para tal. Ao MMAG foi adicionada a informação g_j – grupo da solicitação j , $\forall j = \{1...m\}$, e as restrições $vs_{ik} + vs_{iw} \leq 1$, $\forall i = \{1...n\}$, $\forall k = \{1...m\}$, $\forall w = \{1...m\}$, $g_k \neq g_w$ e $k \neq w$, que garantem que para cada veículo sejam alocadas solicitações de um mesmo grupo; ao AASV foi retirado o loop dos agrupamentos.

3.4. Algoritmo de Roteamento dos Veículos Programados (ARVP)

Para a resolução do PRVP, foi avaliada a utilização dos métodos aplicados na solução do DARP – *Dial-a-Ride Problem*, conforme Mauri e Lorena (2009). Porém, uma vez que o DARP trata as questões de alocação e roteamento de maneira conjunta, além de incluir janelas de tempo que não são necessárias no PRVP, optou-se por utilizar um algoritmo mais simples baseado na heurística de ‘Vizinho Mais Próximo’ descrita em Campello e Maculan (1991), porém modificado de forma que fosse respeitada a ordem de precedência entre coleta e entrega das solicitações. A estratégia proposta é descrita no algoritmo da Figura 6.

O algoritmo ARVP utiliza os seguintes dados de entrada: A – conjunto de alocações, sendo que cada alocação compreende um veículo e as solicitações atendidas pelo mesmo. O produto final do algoritmo ARVP é o conjunto das rotas para cada veículo alocado (R).

<ol style="list-style-type: none"> 1. Procedimento ARVP (A) 2. início 3. para $\forall v \in A, \forall s \in A, \forall r \in R$ faça 4. $p \leftarrow \text{Mapear_pontos}(v, s)$ 5. $r \leftarrow \text{Obter_rota}(p)$ 6. fimpara 7. Retornar(R) 8. fim
--

Figura 6 – Algoritmo de Roteamento dos Veículos Programados (ARVP).

O algoritmo ARVP processa o conjunto de alocações (A) calculado previamente pelo AASV. Para cada alocação, mapeiam-se todos os pontos de visita (p) a partir dos veículos ($v \in A$) e das solicitações neles alocadas ($s \in A$), obtém-se a rota (r) de cada veículo buscando o menor caminho e respeitando a ordem de coleta e entrega das solicitações (heurística de ‘Vizinho Mais Próximo’ com restrições de precedência da coleta sobre a entrega). Finalmente, o algoritmo retorna as rotas (R) de todos os veículos.

3.5. Algoritmo de Programação do Transporte da Bacia de Campos (APTBC)

O algoritmo APTBC, proposto para a resolução do PTRANSBC, integra os algoritmos descritos nas seções anteriores (3.1-3.4) e mostra os detalhes de metodologia proposta para resolver o problema. A estratégia proposta está descrita na Figura 7.

O algoritmo APTBC utiliza os seguintes dados de entrada: S – conjunto inicial de solicitações; V – conjunto de veículos disponíveis; $data$ – data usada para filtrar as solicitações. O produto final do algoritmo APTBC é o conjunto de agrupamentos (G), alocações (A) e rotas (R).


```

1. Procedimento APTBC (S, V, data)
2. início
3. F ← Criar_faixas()
4. para  $\forall f \in F$  faça
5.     enquanto pendente(S)  $\neq \emptyset$  faça
6.         Definir(H, D, E, rh)
7.         G ← AAS(S, data, H, D)
8.         A ← AASV(G, V, f, D, E, rh)
9.         R ← ARVP(A)
10.    fimenquanto
11. fimpara
12. P ← G  $\cup$  A  $\cup$  R
13. Retornar(P)
14. fim

```

Figura 7 – Algoritmo de Programação do Transporte da Bacia de Campos (APTBC).

O algoritmo APTBC faz a programação do transporte numa data especificada (data), a partir da subdivisão do dia em faixas de horários (F). A programação é repetida enquanto houver solicitações (S) pendentes. Para cada faixa, definem-se apropriadamente os parâmetros de limite de horário (H), limite de distância (D), limite de escala (E) e relaxamento de horário dos veículos (rh); realiza-se o agrupamento das solicitações (S) através do AAS; realiza-se a alocação dos agrupamentos (G) através do AASV; realiza-se o roteamento (R) referente às alocações viáveis (A) através do ARVP. Finalmente, retorna os conjuntos de agrupamentos, alocações e rotas gerados, representando os resultados da programação de transporte (P).

A redefinição repetitiva dos parâmetros é necessária, uma vez que nem sempre será possível atender todas as solicitações com os parâmetros iniciais, sendo necessário redefinir esses parâmetros. Este fato pode ocorrer principalmente por não existir veículos suficientes para atender todas as solicitações naquela iteração, ou não existir veículos próximos das solicitações ou em horários compatíveis com as mesmas. A utilização de faixas de horário permite que os mesmos veículos possam atender mais de uma viagem no mesmo dia.

4. Testes e Resultados Computacionais

Para a realização dos testes computacionais, foi criado um protótipo na linguagem *Delphi 6.0*, no qual foram implementados os algoritmos descritos na seção anterior. Foi utilizado o banco de dados *Oracle 8.0* para persistência de dados. O cálculo de coordenadas geográficas foi realizado através do Google Maps (2010). O tratamento dessas coordenadas foi realizado mediante o *Oracle Spatial* (Oracle, 2010). O modelo MMAG foi resolvido mediante o software *Lingo 8.0*, configurado para limitar o tempo de otimização em 15 segundos (Linus, 2010). Os testes foram realizados em um computador com processador Intel Core 2 Duo 2.20GHz, com 2Gb de RAM, no ambiente Windows XP.

Na seção 4.1 descreve-se o procedimento adotado para a geração das instâncias teste. Na seção 4.2 são apresentados os resultados computacionais.

4.1. Geração de Instâncias Teste

Para realização dos testes computacionais foram geradas instâncias denominadas D01 a D13, a partir de dados reais extraídos do STG – Sistema de Transportes Gerais, referentes às solicitações atendidas no período entre 01/09/2009 e 13/09/2009, utilizando-se também dados complementares simulados criteriosamente. Esses dados compreendem: local de origem e destino da solicitação de transporte e regime de trabalho da frota de veículos (horário e frequência). Ao todo, foram utilizados dados de 3223 solicitações e 216 veículos.

Dados complementares que não são disponibilizados pelo sistema STG foram simulados de maneira criteriosa. Esses dados compreendem: quilometragem acumulada por cada veículo ao início do dia (dentro da franquia/mês), a escala dos motoristas e a localização dos veículos. Descrevem-se a seguir os critérios adotados para a geração dos dados complementares. A quilometragem inicial de todos os veículos no dia D01 foi definida em 10km. As localizações dos veículos no dia D01 foram definidas de acordo com a distribuição das origens das solicitações. As solicitações que envolviam percursos distantes de Macaé foram sinalizadas. A escala dos motoristas no dia D01 foi definida de maneira aleatória com valores entre 1 e 4 no caso dos veículos com frequência diária (T.D.), e com valor 1 no caso dos veículos com frequência nos dias úteis (D.U.).

Para facilitar a execução das instâncias D01 a D13 mediante o algoritmo APTBC e permitir múltiplos atendimentos diários pelos veículos, foram definidas cinco faixas de horários descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Faixas de horário utilizadas.

Descrição	Início	Fim
Faixa1	00:00	06:59
Faixa2	07:00	12:00
Faixa3	12:01	17:00
Faixa4	17:01	20:00
Faixa5	20:01	23:59

4.2. Resultados Computacionais

As instâncias de teste D01 a D13 descritas na seção anterior foram resolvidas mediante o algoritmo APTBC. A Tabela 2 e Figuras 8-11 apresentam os resultados obtidos.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados referentes ao número de viagens realizadas, organizados da seguinte forma: a coluna 1 apresenta as 13 instâncias descritas na seção 4.1; a coluna 2 apresenta a quantidade de solicitações de cada instância; as colunas 3-5 apresentam o número de viagens realizadas no método atual, por carro, van e total; as colunas 6-8 apresentam o número de viagens obtido pelo método proposto, por carro, van e total; as colunas 9-11 mostram as porcentagens de melhoria obtidas pelo método proposto com relação ao método atual; a última linha mostra o resumo dos resultados das 13 instâncias. Os resultados da última linha mostram que, em geral, a aplicação do algoritmo APTBC gerou uma redução de 46,4% no número total de viagens realizadas, sendo 46,0% em viagens de carro e 48% em viagens de van.

Tabela 2 – Listagem de resultados referentes às viagens realizadas.

Instâncias	Quantidade solicitações	Número de viagens realizadas						% de melhoria		
		Método atual			Método proposto			Carro	Van	Total
		Carro	Van	Total	Carro	Van	Total			
D01	350	176	39	215	44	38	82	75,0%	2,6%	61,9%
D02	425	199	52	251	112	23	135	43,7%	55,8%	46,2%
D03	419	160	51	211	78	28	106	51,3%	45,1%	49,8%
D04	300	143	30	173	90	15	105	37,1%	50,0%	39,3%
D05	105	62	20	82	44	6	50	29,0%	70,0%	39,0%
D06	59	32	18	50	23	5	28	28,1%	72,2%	44,0%
D07	102	54	19	73	36	8	44	33,3%	57,9%	39,7%
D08	253	117	24	141	64	17	81	45,3%	29,2%	42,6%
D09	354	171	34	205	86	20	106	49,7%	41,2%	48,3%
D10	348	183	26	209	94	14	108	48,6%	46,2%	48,3%
D11	301	148	30	178	87	16	103	41,2%	46,7%	42,1%
D12	134	68	33	101	50	7	57	26,5%	78,8%	43,6%
D13	73	40	20	60	31	9	40	22,5%	55,0%	33,3%
Total	3223	1553	396	1949	839	206	1045	46,0%	48,0%	46,4%

Na Figura 8 é apresentado um gráfico que mostra índices de ocupação médios dos veículos (carros, vans e total) e apresenta as respectivas taxas de melhoria obtidas pelo método proposto. O gráfico compara os índices de ocupação do método atual com aqueles referentes ao método proposto. Os resultados mostram uma melhoria de 86,5% na ocupação média total dos veículos. A ocupação média dos veículos aumentou de 1,65 pessoas/veículo, no método atual, para 3,08 pessoas/veículo, no método proposto. Vale destacar, que o aumento na taxa de ocupação média foi bastante significativo no caso das vans (203,4%), enquanto que mais moderado no caso dos carros (36,9%).

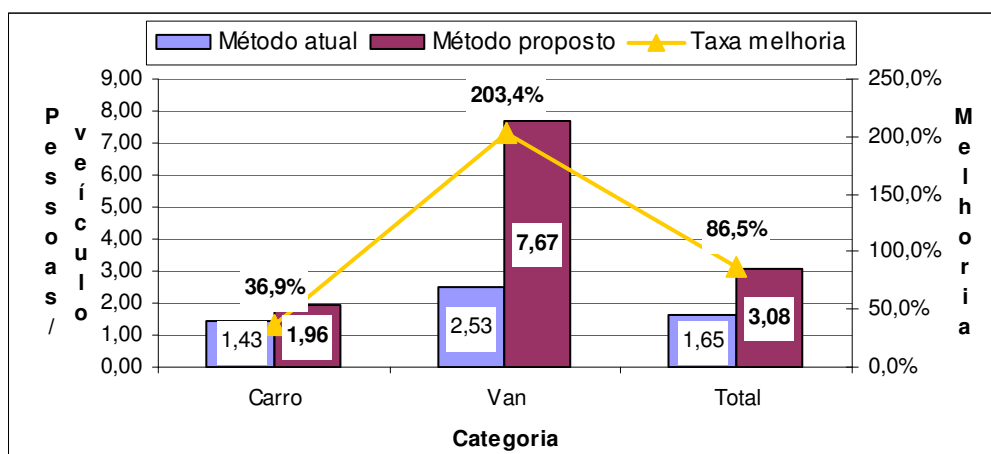


Figura 8 – Gráfico referente à ocupação média dos veículos.

Na Figura 9 é apresentado um gráfico que compara o número de veículos utilizado pelos métodos atual e proposto. Os resultados são apresentados separadamente para carros e vans. Os resultados mostram uma redução de 17,3% no número total de veículos utilizados. Vale observar que, enquanto a redução em carros foi de 20,5%, em vans foi 2,8%.

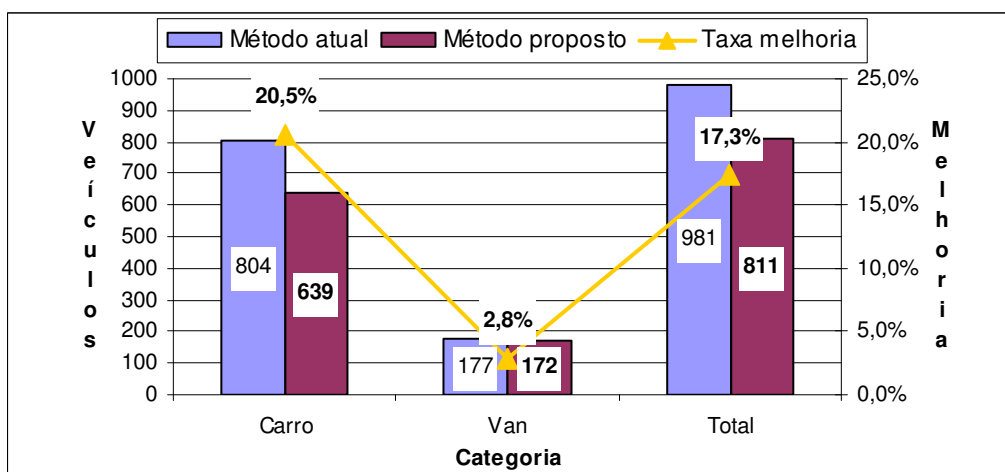


Figura 9 – Gráfico referente ao número de veículos utilizados.

A Figura 10 mostra a distribuição das quilometragens finais dos veículos que receberam programação. Observou-se que 190 veículos foram programados durante o período enquanto que 26 veículos não receberam programação. A quilometragem média por veículo foi de 522 km com desvio padrão 220 km. Observa-se um coeficiente de variação de 0,42, que indica pequeno grau de homogeneidade.

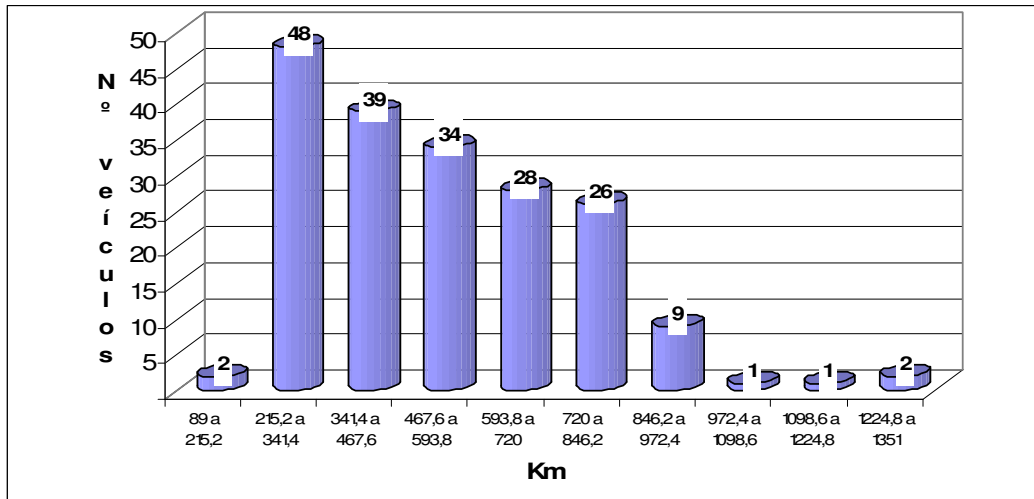


Figura 10 – Distribuição das quilometragens dos veículos ao final do período.

Na Figura 11 é apresentado um gráfico que mostra o tempo total, em segundos, requerido pelo algoritmo APTBC nas tarefas de alocação e roteamento, para cada instância teste. Os resultados mostram que o tempo máximo consumido pelos algoritmos AASV (alocação) e ARVP (roteamento) foi inferior a 2,5 min. Vale lembrar que o algoritmo AASV foi configurado com limite máximo de 15 segundos para cada otimização. Apenas em 1,8% dos casos (14 em 790 grupos) esse limite foi alcançado.

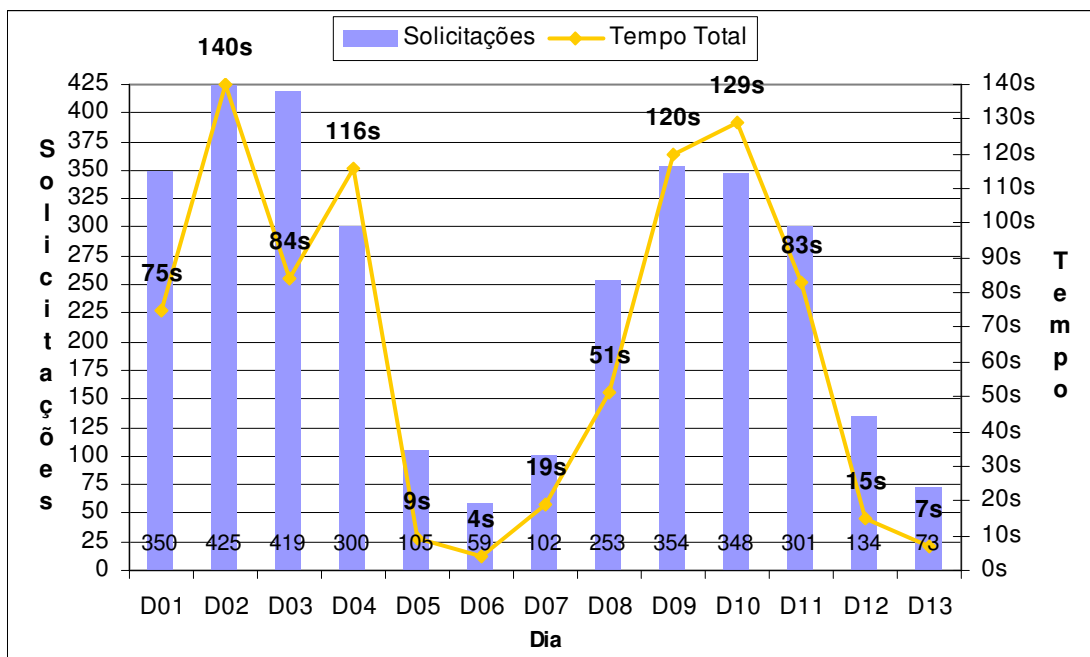


Figura 11 – Gráfico referente ao tempo total de alocação e roteamento.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

A metodologia proposta relevou que é possível fazer uso mais eficiente da frota de veículos da Petrobras na Bacia de Campos. Os testes realizados no período de 13 dias mostraram uma possível redução de 46,4% no nº de viagens, aumento de 86,5% na taxa média de ocupação dos veículos e redução de 17,3% no nº de veículos utilizados. Houve uma melhoria de 203,4% na taxa de ocupação das vans, aumentando de 2,53 para 7,67 pessoas/van. Já para os carros, houve melhoria de 36,9% na taxa de ocupação, com aumento de 1,43 para 1,96 pessoas/carro.

Todos os veículos ficaram com a quilometragem dentro da franquia contratada, não gerando o pagamento de km excedente. Os resultados referentes à quilometragem registraram média de percurso de 522 km e desvio padrão 220 km, resultando em um coeficiente de variação de 0,42, revelando pequeno grau de homogeneidade. Apesar de o algoritmo proposto APTBC visar o uso homogêneo da frota, diversos fatores, tais como restrições de horário e localização geográfica, contribuíram para a redução do número de veículos utilizados.

Da frota de 216 veículos, 26 veículos não foram programados. Tal fato sugere que esses veículos estejam em locais pouco demandados ou que possam ser liberados do contrato. Por outro lado, foi observada a carência de veículos em faixas de horário específicas, principalmente na Faixa1 (00:00 a 06:59), fato que provocou o relaxamento das restrições de horário para atender a demanda, e o conseqüente pagamento de horas extras.

Em 98,2% dos casos, foi possível calcular uma solução ótima do PASV mediante o modelo de alocação MMAG, lembrando que esta é apenas uma das etapas da heurística APTBC. O esforço computacional registrado foi considerado satisfatório, ficando inferior a 2,5 min na resolução conjunta do PASV e PRVP.

Testes computacionais adicionais revelaram que o processamento conjunto dos grupos de solicitações diárias exige um esforço computacional excessivo, sugerindo uma abordagem alternativa como, por exemplo, o uso de técnicas metaheurísticas.

Referências Bibliográficas

- Caldas, M. A. F.; Santos, D. A.** Uma Heurística para Roteamento de Frota de Veículos para a Distribuição de Bebidas em uma Região Urbana. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 40, 2008.
- Campello, R. E.; Maculan, N.** Algoritmos e Heurísticas – Desenvolvimento e Avaliação de Performance. Rio de Janeiro: Editora Eduff, 1991.
- Cunha, C. B.; Mainieri G.; Yoshizaki H. T. Y.; Maluta L.; Henriques L. R. S.** Heurísticas para o problema de bin-packing no contexto da distribuição física de produtos. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 40, 2008.
- Fisher, M. L.; Jaikumar, R.** (1981) A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*.
- Google Maps.** Disponível em: <<http://maps.google.com.br>>. Acesso em: 01 mar 2010.
- Linus, S.** Optimization modeling with lingo. Disponível em: <http://www.lindo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=38&Itemid=24>. Acesso em: 01 mar 2010.
- Mauri, G. R.; Lorena, L. A. N.** (2009) Uma nova abordagem para o problema dial-a-ride. *Produção*, v. 19, n. 1, p.041-054.
- Oracle.** Oracle spatial documentation. Disponível em: <<http://www.oracle.com/technology/documentation/spatial.html>>. Acesso em: 01 mar 2010.
- Rodrigues, S. B.** Metaheurística Colônia de Formigas aplicada a um Problema de Roteamento de Veículos: caso da Itaipu Binacional. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 40, 2008.
- Vitor, A.; Silva, A. C. L.; Souza, L. V.** Determinação do roteamento dos atendimentos de uma empresa de comercialização agrícola – variações de soluções heurísticas. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 41, 2009.