

## PROBLEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE DE PESSOAS NA BACIA DE CAMPOS

Marcos Tayguara dos Santos Aranha<sup>1,3</sup>,  
Fermín Alfredo Tang Montané<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.  
Rua Governador Roberto Silveira, 148, Centro, Macaé, RJ, 27910-000, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Candido Mendes – UCAM-Campos.  
Rua Anita Peçanha, 100, Pq São Caetano, Campos dos Goytacazes, RJ, 28040-320, Brasil.

<sup>3</sup>marcos\_tayguara@yahoo.com.br; <sup>4</sup>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 total number of accomplished trips, reduction of 17.3% in the total 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, o presente trabalho de pesquisa recebeu autorização e apoio da gerência Petrobras responsável pelo Serviço de Transporte Terrestre de Pessoas em Macaé e regiões próximas.

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.

Somente na Bacia de Campos, atuam cerca de 62 mil profissionais nas unidades presentes principalmente em Imbetiba, Parque de Tubos, Terminal de Cabiúnas e plataformas. A demanda de deslocamento entre as unidades é elevada, chegando a uma média de 8 mil solicitações mensais (no período de Janeiro/2008 a Fevereiro/2009), 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 de maneira manual tem trazido diversos problemas para o transporte, aqui chamados de PTRANSBC – Problema de Transporte Terrestre de Pessoas da Bacia de Campos, e contribuído para minimizar a qualidade e confiança no serviço de transporte prestado aos usuários:

- a) utilização heterogênea da frota, fato que têm provocado o pagamento de quilometragem 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, o que também têm provocado o pagamento de horas extras desnecessariamente, já que outros veículos poderiam realizar o mesmo atendimento;
- d) não existência de boas rotas para os atendimentos, fato que tem provocado insatisfação dos usuários com o serviço, já que os horários de atendimento não têm sido satisfatórios, além de contribuir para o estouro das franquias contratadas e pagamento de quilometragem excedente.

Os principais benefícios desejados com este trabalho são: utilizar a frota disponível de maneira homogênea; aumentar a taxa de ocupação dos veículos; reduzir o pagamento de horas extras; reduzir o pagamento de quilometragem excedente; melhorar a qualidade do serviço prestado de transporte.

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 descreve-se com mais detalhes o Problema do Transporte Terrestre de Pessoas da Bacia de Campos (PTRANSBC), onde são abordados: Dinâmica atual da programação de veículos na seção 2.1 e Componentes do problema na seção 2.2.

### 2.1. Dinâmica atual da programação de veículos

Para o atendimento das solicitações, existe uma equipe de profissionais dedicados à tarefa de programação dos veículos, composta por 15 profissionais, incluindo o coordenador, que atua num único centro de programação localizado em Macaé. Cada programador é responsável por um grupo de veículos, numa 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 acomodadas ao planejamento já realizado.

Cada programador visualiza no STG apenas as solicitações associadas ao seu centro de programação e decide quais solicitações programar, de acordo com origens, destinos, horários, antecedência do pedido e seus veículos. A partir da análise das solicitações, o programador decide quais solicitações poderão ser programadas num mesmo veículo, de acordo com a quilometragem no mês, regime, capacidade, localização e escala do motorista.

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, não existe garantia de que seja uma boa escolha.

### 2.2. Componentes do PTRANSBC

A frota de veículos disponível é dividida em carros de gerência e pool, sendo apenas os de pool objeto deste estudo. Em relação ao regime, os veículos são divididos em: 8h (7h às 17h), 12h (7h às 20h) e 24h; T.D. (todos os dias) e D.U. (dias úteis).

No pool, estão disponíveis 170 veículos de passeio que podem transportar até três pessoas e 46 vans de até 16 passageiros, conforme Figura 1.

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 – Modelos, quantidades e franquias da frota de veículos de pool.

Os veículos que trabalham nos dias úteis não possuem escala. Já os veículos que trabalham todos os dias utilizam o esquema 4 x 2: trabalham 4 dias e folgam 2 dias (é o caso de alguns veículos 12h e todos 24h). Deve ser evitado que o motorista atenda uma solicitação de viagem para fora de Macaé no seu 4º dia de trabalho, pois tal procedimento poderá acarretar no pagamento de hora-extra. Também deve ser evitado que os veículos estourem a franquia contratada, pois tal fato poderá acarretar no pagamento de quilometragem excedente.

A Figura 2 ilustra a escala dos motoristas com um exemplo de 2 veículos, sendo M = motorista oficial do veículo e F = motorista folgado, que é o profissional que substitui o motorista oficial nos seus dias de folga.

Veículos/Dia	Veículos T.D. 12h – 7h às 20h															
	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 dos veículos 12h todos os dias.

### 3. Metodologia Proposta

Como proposta de solução do Problema de Transporte Terrestre de Pessoas da Bacia de Campos, divide-se o mesmo em:

- **PAS** – Problema de Agrupamento de Solicitações: agrupar as solicitações de viagem, de acordo com os critérios de mesma data, origens e horários de partida próximos. É proposto o **AAS – Algoritmo de Agrupamento de Solicitações**, descrito na seção 3.1;
- **PASV** – Problema de Alocação das Solicitações aos Veículos disponíveis: montar uma estrutura de alocação para cada agrupamento gerado pelo AAS, levando em consideração os critérios utilizados na programação. É proposto o **AASV – Algoritmo de Alocação de Solicitações aos Veículos por grupo**, descrito na seção 3.2; e o **MMAG – Modelo Matemático de Alocação por Grupo**, descrito na seção 3.3;
- **PRVP** – Problema de Roteamento dos Veículos Programados: determinar boas rotas para a realização dos atendimentos, levando em consideração a menor distância. É proposto o **ARVP – Algoritmo de Roteamento dos Veículos Programados**, descrito na seção 3.4;
- **PTRANSBC** – Problema do Transporte Terrestre de Pessoas da Bacia de Campos: agrupar as solicitações, montar estruturas de alocação para cada grupo e determinar boas rotas de cada veículo programado. É proposto o **AIPTBC – Algoritmo Integrado de Programação do Transporte da Bacia de Campos**, descrito na seção 3.5.

#### 3.1. AAS – Algoritmo de Agrupamento de Solicitações

Em um universo médio de 300 solicitações diárias nos dias úteis e de 80 nos finais de semana, com origens e horários bastante variados, foi decidido agrupar as solicitações para obter uma boa solução global para o PASV através de boas soluções locais de cada grupo, conforme Fisher e Jaikumar (1981) *apud* Caldas e Santos (2008), que implementaram a formação de agrupamentos de clientes ou clusterização.

Os agrupamentos contemplam a possibilidade de gerenciar as inviabilidades, de maneira que cada grupo possa ser avaliado e que pelo menos parte das solicitações pendentes sejam alocadas. A estratégia proposta está descrita na Figura 3.

```

1. Procedimento AAS (s, data, H, D);
2. início
3. sa ← filtrar(s,data); // filtrar as solicitações da data especificada
4. ordenar(sa); // ordenar solicitações por hora de viagem e origem
5. g ← 1; // iniciar grupos
6. agrupar(sa[1],g); // atribuir valor do grupo à solicitação
7. para i ← 2 até n(sa) faça // processar todas as solicitações
8. difh ← horas(sa[i],sa[i-1]); // calcular diferença dos horários das solicitações
9. se difh>H então
10. g ← g + 1;
11. senão
12. difd ← dist(sa[i],sa[i-1]); // calcular diferença de distância das solicitações
13. se difd>D então
14. g ← g + 1;
15. fimse;
16. fimse;
17. agrupar(sa[i],g);
18. fimpara;
19. retornar(sa);
20. fim

```

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

São utilizados os seguintes dados de entrada:  $s$  – lista de solicitações;  $data$  – data usada para filtrar a lista de solicitações;  $H$  – limite de horário considerado para incluir no mesmo grupo horários diferentes, porém próximos;  $D$  – distância máxima permitida em quilômetros para incluir no mesmo grupo origens diferentes, porém próximas. A estratégia de usar limites de horas e quilômetros consiste em agrupar solicitações similares, permitindo que a ocupação dos veículos seja maximizada. Os valores *default* utilizados são  $H = 30$  min e  $D = 20$  km. O produto deste algoritmo é a lista inicial de solicitações com o campo adicional ‘grupo’ preenchido, de acordo com os horários solicitados e as respectivas origens.

### 3.2. AASV – Algoritmo de Alocação de Solicitações aos Veículos por grupo

A partir dos resultados do AAS, cada grupo é submetido ao AASV, de forma que seja encontrada uma boa solução para cada grupo, formando boas soluções locais. A estratégia proposta está descrita na Figura 4.

```

1. Procedimento AASV (sa, v, data, hfaixa, D, E, rh);
2. início
3. sa ← filtrar(sa,data,hfaixa); // filtrar solicitações da data e faixa de horário
4. va ← filtrar(v,data,hfaixa); // filtrar veículos livres na data e faixa horário
5. para i ← 1 até ng(sa) faça // processar todos os grupos
6. dados ← organizar(sa[i],va); // organizar dados necessários para o MMAG
7. aloc[i] ← MMAG(D,E,dados,rh); // submeter dados ao modelo matemático
8. se viável(aloc[i]) então
9. atualizar(va,aloc[i]); // atualizar disponibilidade dos veículos
10. fimse;
11. fimpara;
12. retornar(aloc);
13. fim

```

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

São utilizados os seguintes dados de entrada: *sa* – lista de solicitações agrupadas; *v* – lista de veículos disponíveis; *data* e *hfaixa* – data e faixa de horários usadas para filtrar a lista de solicitações e permitir a extração do regime (todos os dias ou dias úteis) usado no filtro de veículos; *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* utilizados são *D* = 20 km e *E* = 3. A chamada ao MMAG consiste na execução do software de otimização *Lingo* com os dados dos grupos e os parâmetros *D*, *E* e *rh*, utilizados nas restrições.

### 3.3. MMAG – Modelo Matemático de Alocação por Grupo

O MMAG foi construído a partir dos estudos de *bin-packing* de Cunha *et al.* (2008), onde é determinada a alocação dos itens (aqui abordados como solicitações) aos *bins* (aqui abordados como veículos). O MMAG está descrito na Figura 5.

Os dados de entrada são:

- *n* : número de veículos;
- *m* : número de solicitações;
- *q<sub>i</sub>* : capacidade de carga (pessoas) do veículo *i*,  $\forall i = \{1...n\}$ ;
- *km<sub>i</sub>* : quilometragem atual do veículo *i*,  $\forall i = \{1...n\}$ ;
- *e<sub>i</sub>* : escala atual do motorista do veículo *i*,  $e_i \in \{1,2,3,4\}$  e  $\forall i = \{1...n\}$ ;
- *hi<sub>i</sub>* : horário inicial de expediente do veículo *i*,  $\forall i = \{1...n\}$ ;
- *hf<sub>i</sub>* : horário final de expediente do veículo *i*,  $\forall i = \{1...n\}$ ;
- *hs<sub>j</sub>* : horário de viagem da solicitação *j*,  $\forall j = \{1...m\}$ ;
- *ex<sub>j</sub>* : indicador de viagem externa, onde *ex<sub>j</sub>* = 1 se a solicitação *j* é viagem externa e *ex<sub>j</sub>* = 0 caso contrário,  $\forall j = \{1...m\}$ ;
- *d<sub>ij</sub>* : distância (km) entre veículo *i* e solicitação *j*,  $\forall i = \{1...n\}$  e  $\forall j = \{1...m\}$ ;
- *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:

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

Minimizar: $\sum_{i=1}^n km_i \cdot v_i$	(1)
Sujeito a:	
$\sum_{j=1}^m vs_{ij} \leq q_i \cdot v_i,$	$\forall i = \{1...n\}$ (2)
$\sum_{i=1}^n vs_{ij} = 1,$	$\forall j = \{1...m\}$ (3)
$hs_j \cdot vs_{ij} \geq hi_i \cdot vs_{ij},$	$\forall i = \{1...n\} \text{ e } \forall j = \{1...m\}$ (4)
$hs_j \cdot vs_{ij} \leq hf_i \cdot vs_{ij},$	$\forall i = \{1...n\} \text{ e } \forall j = \{1...m\}$ (5)
$d_{ij} \cdot vs_{ij} \leq D \cdot vs_{ij},$	$\forall i = \{1...n\} \text{ e } \forall j = \{1...m\}$ (6)
$e_i \cdot vs_{ij} \leq E \cdot vs_{ij},$	$\forall i = \{1...n\}, \forall j = \{1...m\} \text{ e } \forall ex_j = 1$ (7)
$v_i \in \{0,1\} \text{ e } vs_{ij} \in \{0,1\},$	$\forall i = \{1...n\} \text{ e } \forall j = \{1...m\}$ (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 número de veículos alocados. As restrições (2) asseguram que a capacidade dos veículos utilizados 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. O produto final de AASV e MMAG é a lista de solicitações alocadas.

### 3.4. ARVP – Algoritmo de Roteamento dos Veículos Programados

Para a resolução do PRVP, foi avaliada a possibilidade de utilização da metodologia DARP – *Dial-a-Ride Problem*, conforme Mauri e Lorena (2009). Porém, em função do DARP tratar tanto a alocação quanto o roteamento de uma só vez, além de trabalhar com janelas de horário, não necessárias no PRVP, tal metodologia foi substituída por um algoritmo baseado na heurística ‘Vizinho Mais Próximo’ descrita em Campello e Maculan (1991), porém modificada de forma que fosse respeitada a ordem de precedência entre coleta e entrega das solicitações, bem como a exclusão da última rota, já que no PRVP o veículo não retorna ao seu ponto de origem, sendo aproveitado para outra viagem. A estratégia proposta está descrita na Figura 6.

```

1. Procedimento ARVP (aloc);
2.   início
3.   va ← veículos(aloc);           // extrair veículos alocados
4.   p ← pontos(aloc);             // extrair pontos de coleta e entrega de solicitações
5.   para v ← 1 até n(va) faça     // processar toda lista de veículos
6.     mapear(v,p[v], r,fr);       // mapear pontos não roteados (fr) e roteados (r)
7.     enquanto n(fr[v]) ≠ 0 faça // rotear todos os pontos não roteados
8.       melhor ← +∞ ;
9.       para i ← 1 até n(r[v]) faça
10.        para j ← 1 até n(fr[v]) faça
11.          se dist(i,j)<melhor e preced(fr[v]) então // escolher ponto de menor distância,
12.            melhor ← dist(i,j);                    // respeitando a precedência
13.            z ← (i,j);
14.          fimse;
15.        fimpara;
16.      fimpara;
17.      atualizar(r[v],fr[v],z); // rotear o ponto de menor distância
18.    fimenquanto;
19.  fimpara;
20.  retornar(r);
21. fim

```

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

São utilizados os seguintes dados de entrada: *aloc* – lista de solicitações e veículos alocados. O produto final do modelo ARVP é a lista das rotas de todos os veículos alocados.

### 3.5 AIPTBC – Algoritmo Integrado de Programação do Transporte da Bacia de Campos

O presente algoritmo realiza a programação do transporte em um período definido, que neste trabalho considerou as instâncias compreendidas de D01 a D13, que consistem nos dados referentes às programações realizadas na Bacia de Campos no período de 01/09 a 13/09/2009.

Todas as instâncias D01 a D13 são submetidas a AAS, AASV e MMAG em cinco faixas de horários determinadas conforme Tabela 1, que segue o esquema de regime dos veículos, até que toda demanda de cada instância seja alocada. A utilização da Tabela 1 permite setorizar a alocação, de forma que os mesmos veículos possam atender mais de uma viagem no mesmo dia.

Tabela 1 – Faixas de horário.

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

Todos os veículos alocados de cada instância são submetidos ao ARVP para geração das respectivas rotas. Com as rotas criadas, é possível calcular o horário estimado de embarque e desembarque de cada passageiro, além do horário estimado de liberação de cada veículo. É possível também determinar a localização do veículo a ser considerada na sua próxima viagem. Estes cálculos foram realizados numa velocidade média de 80km/h. A estratégia proposta está descrita na Figura 7.

```

1. Procedimento AIPTBC (s, v);
2.   início
3.   para i ← D01 até D13 faça           // processar todas as instâncias (dias)
4.     para j ← faixa1 até faixa5 faça   // processar todas as faixas de horário
5.       enquanto pendente(s[i,j]) faça // enquanto houver solicitações não alocadas
6.         entrada(H, D, E, rh);       // receber parâmetros para programação
7.         sa ← AAS(s[i,j], i, H, D); // agrupar solicitações
8.         aloc[i,j] ← AASV(sa, v[i,j], i, j, D, E, rh); // alocar solicitações aos veículos
9.         r[i,j] ← ARVP(aloc[i,j]); // roteirizar veículos alocados
10.      fimenquanto;
11.    fimpara;
12.  fimpara;
13.  retornar(sa,aloc,r);
14.  fim

```

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

São utilizados os seguintes dados de entrada: *s* – lista de solicitações; *v* – frota de veículos disponível.

O procedimento *entrada*(*H*, *D*, *E*, *rh*) é necessário em função de ser possível o não atendimento de toda demanda na primeira alocação para determinadas instâncias/faixas de horário. Este fato pode ocorrer principalmente por não existir veículos suficientes para atender toda demanda naquela iteração, ou não existir veículos próximos das solicitações, ou em horários compatíveis com as mesmas. Faz-se então necessário ajustar os parâmetros de limite de escala (*E*), limite de distância (*D*) e relaxamento das restrições de horário dos veículos (*rh*), para evitar que situações de inviabilidade prejudiquem o atendimento das demandas por completo.

O produto final do AIPTBC é o resultado da programação do transporte, dividido em: agrupamentos de solicitações, alocação das solicitações aos veículos e roteamento dos veículos alocados.

#### 4. Testes e Resultados Computacionais

Para a realização dos testes computacionais, foi criado um protótipo na linguagem *Delphi 6.0* com banco de dados *Oracle 8.0*. Para os procedimentos de localização geográfica, foi utilizado *Oracle Spatial*, com o apoio da documentação disponível em Oracle (2010). Para rodar o MMAG foi usado *Lingo 8.0*, configurado para limitar o tempo de otimização em 15 segundos e retornar a melhor solução possível, com a contribuição do material disponibilizado por Linus (2010). O equipamento utilizado foi um computador com processador Intel Core 2 Duo 2.20GHz, com 2Gb de RAM, no ambiente Windows XP.

Na seção 4.1 são descritos os Dados Utilizados. Na seção 4.2 são apresentados os Resultados Computacionais.

##### 4.1. Dados Utilizados

Foram utilizados dados extraídos do STG, referentes às programações realizadas na Bacia de Campos no período compreendido de 01/09/2009 a 13/09/2009, aqui chamados de instâncias D01 a D13. Para sua utilização nos modelos propostos, os dados receberam o seguinte processamento:

1. Exclusão de dados duplicados;
2. Adição de informações não disponíveis no STG: quilometragem atual do veículo dentro da franquia/mês; escala do motorista; horário de expediente dos veículos; *flag* indicativo de viagem distante de Macaé; regime (T.D. ou D.U.); localização dos veículos;
3. Conversão dos dados de localização textual, tanto dos veículos como das solicitações, para coordenadas geográficas, através do Google Maps (2010);
4. Exclusão de solicitações com endereços inválidos ou incompletos.

Todos os veículos foram iniciados em D01 com 10km. Tanto o regime como o horário de expediente dos veículos foram extraídos de suas informações disponíveis no campo 'modelo' disponível no STG. As localizações das solicitações, tanto as origens como os destinos, foram extraídas dos campos associados ao endereço de cada. Os veículos foram posicionados em D01 num quantitativo proporcional ao número de solicitações por origem. As solicitações que envolviam percursos distantes de Macaé foram sinalizadas. As escalas foram preenchidas em D01 aleatoriamente com valores de 1 a 4 para veículos T.D. e 1 para veículos D.U.

Ao todo, foram utilizados nos testes computacionais dados referentes a 3223 solicitações e 216 veículos ao longo de D01 a D13.

##### 4.2. Resultados Computacionais

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 apresentam as porcentagens de melhoria obtidas pelo método proposto com relação ao método atual; a última linha apresenta o somatório das colunas 2-8 e as porcentagens totais de melhoria obtidas pelo método proposto com relação ao método atual das colunas 9-11.

Os resultados da Tabela 2 mostram que a aplicação do AIPTBC produziu uma redução de 46,4% no número total de viagens realizadas, expressos em 46,0% para viagens de carro e 48% em viagens de van.

Tabela 2 – Número de 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	<b>46,0%</b>	<b>48,0%</b>	<b>46,4%</b>

Na Tabela 3 é apresentado o resumo dos resultados referentes ao número de veículos utilizados, organizados da seguinte forma: a coluna 1 apresenta os dados expostos; as colunas 2-3 apresentam o número de veículos utilizados separados em carro e van; a coluna 4 apresenta o somatório de veículos utilizados; a última linha apresenta as porcentagens de melhoria obtidas pelo método proposto com relação ao método atual. Os resultados da Tabela 3 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%.

Tabela 3 – Número de veículos utilizados.

Dados	Número de veículos utilizados		Total
	Carro	Van	
Método atual	804	177	981
Método proposto	639	172	811
% de melhoria	<b>20,5%</b>	<b>2,8%</b>	<b>17,3%</b>

Na Tabela 4 é apresentado o resumo dos resultados referentes à ocupação média dos veículos, organizados da seguinte forma: a coluna 1 apresenta os dados expostos; as colunas 2-3 apresentam a média de pessoas por viagem, em carro e van; a coluna 4 apresenta a média total de pessoas por viagem; a última linha apresenta as porcentagens de melhoria obtidas pelo método proposto com relação ao método atual. Os resultados da Tabela 4 mostram uma melhoria total de 86,5% na ocupação média dos veículos. Vale observar que, enquanto a melhoria em carros foi de 36,9%, nas vans foi de 203,4%. Também é importante destacar que houve uma evolução na ocupação média total de 1,65 pessoas/veículo do método atual para 3,08 pessoas/veículo no método proposto.

Tabela 4 – Comparativo de ocupação média dos veículos.

Dados	Ocupação média dos veículos		Total
	Carro	Van	
Método atual	1,43	2,53	<b>1,65</b>
Método proposto	1,96	7,67	<b>3,08</b>
% de melhoria	<b>36,9%</b>	<b>203,4%</b>	<b>86,5%</b>

Na Tabela 5 são apresentados os tempos de execução da alocação e roteamento, 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 3-4 apresentam o tempo de execução em segundos para a alocação e roteamento; a colunas 5 apresenta a soma dos tempos; a última linha apresenta o somatório das colunas 2-5. A Tabela 5 mostra os tempos correspondentes à execução dos algoritmos AASV (alocação) e ARVP (roteamento). Os resultados mostram que o tempo máximo consumido pelo AASV e ARVP foi inferior a 2,5 min. Vale lembrar que no caso do AASV, a resolução de cada instância compreende a resolução de subproblemas com limite máximo de 15 segundos para execução. Em apenas 1,8% dos casos (14 em 790 grupos) esse limite foi alcançado.

Tabela 5 – Tempos de execução da alocação e roteamento.

Instâncias	Quantidade solicitações	Tempo em segundos		
		AASV	ARVP	Total
D01	350	56	19	<b>75</b>
D02	425	112	28	<b>140</b>
D03	419	62	22	<b>84</b>
D04	300	97	19	<b>116</b>
D05	105	1	8	<b>9</b>
D06	59	<1	4	<b>4</b>
D07	102	12	7	<b>19</b>
D08	253	37	14	<b>51</b>
D09	354	96	24	<b>120</b>
D10	348	107	22	<b>129</b>
D11	301	62	21	<b>83</b>
D12	134	3	12	<b>15</b>
D13	73	<1	7	<b>7</b>
Total	3223	645	207	852

A Figura 8 mostra a distribuição das quilometragens totais dos 190 veículos que foram programados, sendo que 26 veículos ficaram fora da programação. A quilometragem média por veículo foi de 522 km com desvio padrão em 220 km, resultando em um coeficiente de variação de 0,42 indicando pequeno grau de homogeneidade.

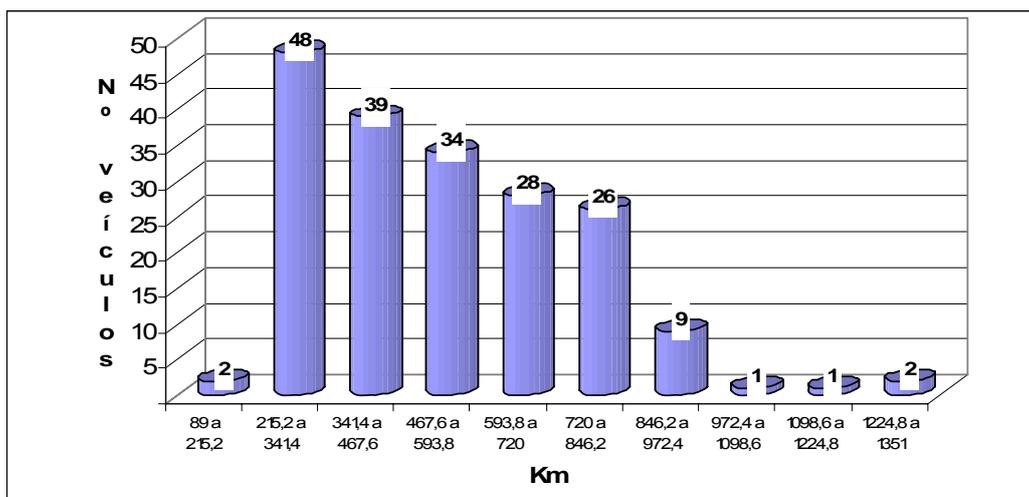


Figura 8 – Distribuição das quilometragens dos veículos ao final do D13.

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

A metodologia proposta relevou que é possível fazer um uso mais eficiente da frota de veículos na Bacia de Campos. Esses resultados foram avaliados positivamente pela Petrobras, o que levou a empresa a reavaliar sua logística de transporte. Os testes realizados no período de 13 dias mostraram uma possível redução no número total de viagens de 46,4%, um aumento na taxa de ocupação geral dos veículos em 86,5% e redução de 17,3% no número total de veículos utilizados. Houve uma melhoria de 203,4% na taxa de ocupação média das vans, aumentando de 2,53 pessoas/van para 7,67 pessoas/van. Houve uma melhoria de 36,9% na taxa de ocupação média dos carros, aumentando de 1,43 pessoas/carro para 1,96 pessoas/carro.

Os resultados referentes à quilometragem revelaram que no período pesquisado, houve um pequeno grau de homogeneidade, pois a média foi de 522 km com desvio padrão 220 km, percebendo um coeficiente de variação de 0,42. Todos os veículos ficaram com a quilometragem dentro da franquia contratada, não gerando quilômetros excedentes.

Apesar de o algoritmo proposto AIPTBC visar o uso homogêneo da frota, diversos fatores contribuíram para a redução do número total de veículos utilizados, tais como restrições de horário e localização geográfica. Da frota de 216 veículos, 26 não foram programados durante o período abordado. Tal fato sugere que tais 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), o que provocou o relaxamento das restrições de horário dos veículos e o conseqüente pagamento de horas extras.

Em 98,2% dos casos, foi possível calcular a solução ótima do PASV mediante o modelo de alocação MMAG. O esforço computacional apurado 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](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.