



OTIMIZAÇÃO NO SERVIÇO DO ESTACIONAMENTO ROTATIVO REGULAMENTADO UTILIZANDO TÉCNICAS DA PESQUISA OPERACIONAL

Marco Antonio Velasco Capri

Universidade Federal do Paraná – UFPR
Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia
CP: 19081; Curitiba, PR; CEP: 81531-990
e-mail: marcocapri@convoy.com.br

Maria Teresinha Arns Steiner

Universidade Federal do Paraná – UFPR
Departamento de Matemática - Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia
- CP: 19081 – Curitiba, PR; CEP: 81531-990
e-mail: tere@mat.ufpr.br

RESUMO

Para que se garanta a rotatividade em estacionamentos centrais de grandes centros urbanos, tem sido implantada uma estrutura conhecida como Estacionamento Rotativo Regulamentado. Para o desenvolvimento deste trabalho, tomou-se como modelo os dados relativos ao município de Ponta Grossa, PR. O objetivo deste trabalho é obter de forma eficaz e eficiente a distribuição dos trechos de quadra em setores a serem percorridos pelos orientadores (fiscais) e a determinação das áreas compostas por estes setores, de forma a minimizar a distância total a ser percorrida pelos mesmos, otimizando o seu trabalho de fiscalização. O trabalho visa, também, a informatização de todo processo de distribuição dos setores a serem supervisionados, garantindo a automatização do mesmo.

PALAVRAS CHAVE: Técnicas de Pesquisa Operacional, Problema das p -medianas, Estudo de Caso. Área: Logística e Transportes.

ABSTRACT

The controlled use of the parking places on busy streets in a city is needed in order to allow all people to access the available spaces. In order to assure the turnover of these parking areas, it has been implanted a structure, known as Regular Turnover Parking. To develop this work, data from the city of Ponta Grossa, PR, were used as model. The goal of this work is to get an efficient distribution of sectors of the blocks into sections to be run by the inspectors and the determination of the areas, composed by these sections. In this way, the whole distance performed by the inspectors, is minimized, optimizing their work of checking. Furthermore, the work aims to adjust the whole process of the sections distribution to be supervised into a suitable software, warring its automation.

KEYWORDS: Operations Research Techniques, p -medians Problem, Case Study. Main area: Logistic and Transport.

1. Introdução

O Estacionamento Rotativo Regulamentado tem sido implementado em diversas cidades com o objetivo de garantir a rotatividade de veículos nos estacionamentos públicos. O sistema conta com orientadores (agentes fiscais) que percorrem as vias verificando se os veículos permanecem estacionados dentro de um certo intervalo de tempo, indicado nos cartões de estacionamento. Para que o sistema funcione é necessário uma fiscalização eficiente.

O objetivo deste trabalho é obter de forma rápida, eficiente e automática a distribuição dos trechos de quadra a serem fiscalizados, em setores a serem percorridos pelos referidos orientadores levando em consideração a quantidade de vagas por trecho bem como a taxa de ocupação das mesmas. Deste modo, estar-se-á minimizando a distância percorrida pelos orientadores, gerando uma maior eficiência na fiscalização, garantindo aos usuários uma disponibilidade maior de vagas, aumentando, assim, a rotatividade dos veículos nestes estacionamentos.

2. Descrição do Problema

O aumento excessivo da frota de veículos tem provocado uma expansão acelerada das áreas destinadas ao Estacionamento Rotativo Regulamentado. A elaboração dos mapas de cobertura dos trechos de quadra a serem fiscalizados é feita, atualmente, de forma manual e empírica. A cada trecho adicionado ou retirado, surge a dúvida com relação a forma de ampliação ou redução de setores e, ainda, da contratação ou demissão de pessoal.

Certos trechos de quadra possuem mais vagas do que outros e, por outro lado, certos setores, de toda a região, possuem uma taxa maior de ocupação. Tudo isso exige que a distribuição dos agentes fiscais nos setores não seja feita de forma intuitiva, pois desta maneira alguns setores ficariam sobrecarregados e outros ociosos sob o ponto de vista da fiscalização.

Em Ponta Grossa, PR, existe a chamada área de Estacionamento Regulamentado, conhecida como Zona Azul, administrada pela Autarquia Municipal de Trânsito, que tem a finalidade de planejar, promover, executar e acompanhar as ações na área. A referida Autarquia conta, atualmente, com um total de 69 funcionários e administra, aproximadamente, 2.500 vagas da Zona Azul.

A área destinada à Zona Azul está localizada, quase que na sua totalidade, na região central da cidade e é composta por 232 trechos de quadra. Estes trechos, agrupados no mínimo em 6 e no máximo em 12, formam 28 setores. Os setores, por sua vez, agrupados em 7, formam 4 grandes áreas. Esta configuração sofre alterações toda vez que ocorre a inclusão ou supressão de novos trechos. Assim sendo, são confeccionados alguns mapas que servem para orientação do trabalho de campo dos orientadores. Estes mapas, em função da escala utilizada, oferecem às orientadoras, apenas a informação básica de localização dos trechos que serão supervisionados.

O trabalho desenvolvido nas ruas encontra-se distribuído basicamente entre Orientadores(as) de trânsito (num total de 59, sendo que cada agente fiscaliza um determinado setor) e Supervisores(as) de trânsito (num total de 10, cada supervisor coordena um conjunto de 7 setores). Como existem 4 áreas e 2 turnos de trabalho, este pessoal forma ao todo, 8 equipes. Cada equipe, no seu respectivo turno, atua uma semana em cada área, de modo a percorrer seqüencialmente todas as áreas ao longo do mês. Existe também, em cada grupo, um sistema de rodízio entre as orientadoras, cabendo a supervisora organizar este rodízio, que deve compreender todos os setores sob sua responsabilidade. O objetivo deste rodízio é fazer com que as orientadoras não permaneçam mais que um dia em cada setor.

A escala diária de trabalho é feita pela supervisora, enquanto o grupo se prepara para ir a campo e, posteriormente, repassada para à administração. Nos dias em que faltam orientadoras é realizado um acúmulo (junção) de setores.

Pode-se observar que o número de trechos por setor é variável; isto ocorre devido a alguns setores estarem localizados em áreas de maior taxa de ocupação. Setores com maior taxa de ocupação possuem um número menor de trechos, enquanto que os setores com menor taxa,

possuem mais trechos. No setor 8, por exemplo, cada agente fiscal precisa atender a 97 vagas, enquanto que no setor 23, cada agente atende a somente 37 vagas. Mesmo considerando as taxas de ocupação de cada trecho como alta, média e baixa, esta diferença é significativa.

O ideal é ter-se uma distribuição uniforme das vagas, considerando as taxas de ocupação nos 28 setores, partindo-se do pressuposto que todos os fiscais possuem a mesma capacidade de trabalho.

Pode-se citar alguns publicações relacionadas a este trabalho: problemas de localização de facilidades, formação de agrupamentos, algoritmos genéticos e algoritmos de busca tabu. WEBER, *apud* LOBO, 1998, em um trabalho publicado em 1909, buscava a localização de uma indústria de modo a minimizar os custos de transporte da matéria-prima e também os custos de transporte do produto até o consumidor; o autor considerou uma área onde existia somente um único mercado consumidor e duas regiões fornecedoras de matéria-prima. Este trabalho é tido como a gênese da teoria da localização.

TEITZ e BART, 1968, propuseram um método aproximado para encontrar a mediana de um grafo ponderado. O método consiste na procura de uma solução através de troca de vértices, a partir de uma solução inicial. Esse método é descrito e utilizado neste trabalho. CHRISTOFIDES, 1975, trabalhou com os problemas de localização de facilidades e roteamento de veículos. Seus trabalhos deram início ao estudo de algoritmos de resolução para estes problemas, contendo formulações matemáticas estruturadas para os problemas dos p -centros, p -medianas e o problema do caixeiro viajante.

COSTA *et al.*, 2000, desenvolveram um estudo para a otimização da entrega de correspondências dos serviços postais, realizando o trabalho em duas fases: a primeira dividindo a região de estudo em sub-regiões e a segunda utilizando algoritmos de cobertura de arcos e de cobertura de nós, para realizar a tarefa de roteamento em cada sub-região. CORRÊA *et al.*, 2004, compararam os algoritmos Genético e Busca Tabu, para otimizar a designação de candidatos ao vestibular da Universidade Federal do Paraná (UFPR), de maneira que os candidatos prestassem as provas nos locais mais próximos de suas residências. No caso do Algoritmo Genético, foram utilizados os operadores genéticos usuais e um operador heurístico chamado "hipermutação direcionada"; já no caso da heurística Busca Tabu foram utilizadas memórias de curto e longo prazo para controlar a busca.

SMIDERLE *et al.*, 2004, propuseram uma solução para o trabalho de leitura dos medidores das contas de água dos clientes efetuado por uma empresa de saneamento básico do município de Pato Branco, PR. A metodologia utilizada apresentou duas fases: a primeira formando os grupos de atendimento para cada leitorista, onde foi utilizada a meta-heurística Algoritmo Genético seguida da aplicação da heurística clássica de Teitz e Bart, e, a segunda, propõe a melhor rota a ser seguida, de modo a minimizar a distância a ser percorrida por cada leitorista, utilizando o algoritmo do Carteiro Chinês.

ROSÁRIO *et al.*, 2002, propuseram uma metodologia para a distribuição espacial de Unidades de Saúde 24 Horas, com o objetivo de minimizar a distância média de deslocamento dos usuários, desde suas residências até a unidade mais próxima. Foram utilizados os algoritmos genéticos, o algoritmo de Teitz e Bart, a busca exaustiva e os diagramas de Voronoi. GONÇALVES *et al.*, 2005, determinaram uma metodologia para realizar a tarefa de roteamento no serviço de entrega de água mineral para a cidade de Itú, SP. Foi utilizado o algoritmo de Teitz e Bart para a determinação de medianas, algoritmo de Gillet e Johnson para formação dos *clusters* a serem atendidos pelos veículos e, finalmente, técnicas de roteamento: os algoritmos heurísticos dos *Savings* de Clarke e Wright, da Inserção do Mais Próximo, de Busca Tabu e suas combinações.

PIZZOLATO, 2004, relata uma proposta metodológica para localização de escolas públicas em áreas urbanas. A metodologia é dividida em duas partes, a primeira avalia a localização atual da escola e a segunda faz uma proposta de "relocalização" (melhoria). O estudo destaca a evolução metodológica, desde o uso de mapas até o emprego de *softwares* da família SIG (Sistema de Informação Geográficas). BARCELOS, 2004, apresenta um trabalho de localização de escolas do ensino fundamental na cidade de Vitória, ES. O estudo foi dividido em

três partes. Na primeira parte, o objetivo do trabalho é avaliar a localização atual das escolas públicas, identificando regiões onde há excesso ou escassez de vagas; a segunda propõe a "relocalização" das escolas pelo modelo das p -medianas e, finalmente, a terceira considera o problema das p -medianas capacitado e refaz o estudo da "relocalização" supondo as escolas com capacidade definida. BORNSTEIN, 2004, considera um problema de localização de facilidades capacitado com custos de transporte lineares. São apresentados testes exatos e heurísticas. Um algoritmo heurístico é proposto baseado em estratégias *ADD/DROP* (adicionar/retirar) da Busca Tabu. Os procedimentos consideram limites inferiores e superiores provenientes da relaxação Lagrangeana.

3. Metodologia do Trabalho

A metodologia apresentada neste trabalho permite a automatização na confecção dos mapas de cobertura anteriormente mencionados. O sistema computacional, contendo alguns algoritmos matemáticos da área de Pesquisa Operacional, descritos sucintamente a seguir, informa de forma rápida e eficiente:

- o número ideal de setores compostos por trechos de quadra, através da utilização de algoritmos para solucionar o problema das p -medianas e
- como deve ocorrer a designação de novos trechos aos setores, através de um modelo matemático que combina os modelos de transporte e de designação, otimizando, assim, todo o processo e garantindo uma melhor fiscalização e uma maior satisfação por parte dos usuários deste serviço.

3.1 Problemas das p -medianas

Para solucionar o problema das p -medianas capacitado foram utilizados os seguintes algoritmos: de Teitz & Bart (T&B); Genéticos (AGs); Busca Tabu (BT) e suas combinações.

O algoritmo das p -medianas proposto por TEITZ e BART, 1968, é um método aproximado, baseado na substituição de vértices em um grafo $G(V, A)$, com V vértices e A arestas. O objetivo do algoritmo de T&B é, portanto, encontrar um conjunto $V_p \subset V$, para o qual o número de transmissão (soma das menores distâncias existentes entre os vértices $v_i \in V_p$ e todos os demais vértices do grafo) seja mínimo.

Já no problema das p -medianas capacitado, os vértices de V possuem restrições de capacidade. O objetivo é encontrar um conjunto de vértices $V_p \subset V$, de forma que a soma das distâncias de cada vértice restante $\{V - V_p\}$ que representa o conjunto das demandas, até seu vértice mais próximo em V_p , seja a mínima possível. A diferença do problema das p -medianas para o p -medianas capacitado é que neste, deve-se garantir que todos os pontos de demanda sejam atendidos respeitando-se as restrições de capacidade das instalações medianas.

O problema das p -medianas, resolvido através dos AGs gera, inicialmente, uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser considerados como possíveis soluções do problema. Durante o processo evolutivo cada indivíduo tem um valor (*fitness*) atribuído, que indica a sua habilidade de adaptação a um determinado ambiente. Os indivíduos com melhor valor de adaptação são mantidos, enquanto que os demais são descartados. Os indivíduos mantidos pela seleção podem sofrer mudanças em suas características fundamentais através de mutações e cruzamentos (*crossover*) ou recombinação genética, gerando descendentes para a próxima geração. Este processo é repetido até encontrar-se uma solução satisfatória.

Existem vários parâmetros dos AGs que podem ser escolhidos para melhorar o seu desempenho, adaptando-o às características particulares de determinadas classes de problemas. Entre eles, os mais importantes são: o tamanho da população, o número de gerações, as probabilidades de *crossover* e de mutação. A influência de cada parâmetro no desempenho do algoritmo depende da classe de problemas que está-se tratando. Assim, a determinação de um

conjunto de valores otimizado para estes parâmetros dependerá da realização de um grande número de experimentos e testes.

O método de Busca Tabu para o problema das p -medianas seleciona, inicialmente, uma solução aleatória x . Realiza, então, uma busca local, procurando todas as soluções vizinhas a x , $N(x)$. A partir dessas soluções, seleciona-se a melhor solução x' (não necessariamente melhor do que a solução inicial x). A solução inicial é movida para a melhor solução vizinha e a nova solução é adicionada à lista Tabu. A partir dessa nova solução, realiza-se novamente uma busca local e novamente uma solução vizinha é selecionada como candidata para o próximo movimento.

3.2 O Problema dos Agrupamentos

Um modelo matemático, baseado nos modelos matemáticos de transportes e de designação, foi desenvolvido com a finalidade específica de designar os pontos às medianas encontradas. O que o diferencia do modelo de designação, propriamente dito, é que neste último o objetivo é alocar as origens (pontos) aos destinos (medianas) a um custo mínimo (mínima distância), considerando as ofertas e demandas unitárias; já no modelo matemático desenvolvido, além da preocupação da alocação a um custo mínimo, atenta-se também para o valor das ofertas e demandas respeitando a capacidade das medianas como no modelo de transportes. Esta combinação deu origem ao modelo matemático apresentado a seguir.

Considerando-se que:

- há 204 trechos com a_j unidades a serem designadas (peso dos trechos) no trecho j ($j=1,2,3,\dots,204$);
- há 28 medianas com b_i unidades disponíveis (capacidades médias das medianas) na mediana i ($i=1,2,3,\dots,28$);
- o custo para transportar uma unidade do trecho j a mediana i é dado por c_{ij} ;
- $x_{ij} = 1$, se o trecho j for designado para a mediana i ;
0, caso contrário;

tem-se que:

$$\text{Min. } Z = \sum_{i=1}^{28} \sum_{j=1}^{204} c_{ij} x_{ij}$$

(1)

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^{28} x_{ij} = 1 \quad (j = 1, 2, 3, \dots, 204)$$

(2)

$$\sum_{j=1}^{204} a_j x_{ij} \leq b_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 28)$$

(3)

$$x_{ij} = 1, \text{ se o trecho } j \text{ for designado para a mediana } i;$$

(4)

0, caso contrário

A função objetivo em (1) garante a alocação dos 204 pontos às 28 medianas a um custo mínimo de transporte, ou seja, minimiza a distância percorrida pelos agentes fiscais; o conjunto de restrições em (2) obriga que cada trecho seja designado a apenas uma mediana; o conjunto de restrições em (3) indica que cada mediana possui uma capacidade b_i que não deve ser violada; o conjunto de restrições em (4) indica que todas as variáveis são binárias.

4. Implementação Computacional e Obtenção dos Resultados

Inicialmente foi feito o cadastramento dos trechos de quadra onde existe o estacionamento regulamentado, levantando o número de vagas de cada trecho bem como sua taxa de ocupação. Deste modo, foram cadastrados 232 pontos em um mapa digitalizado, cada um deles situado no ponto médio de cada trecho, significando que todo aquele trecho deve ser "atendido", ou seja, fiscalizado. Estes pontos médios formam, assim, o conjunto dos pontos de atendimento dos agentes fiscais. Designando estes pontos para os agentes, estar-se-á atribuindo todo um trecho de quadra que deverá ser fiscalizado, estando assim definidos quais trechos irão para quais agentes, formando os setores de fiscalização.

Como a fiscalização destes 232 trechos é efetuada por 28 agentes fiscais, existe então, a necessidade da divisão destes trechos em 28 setores, um setor para cada fiscal. Assim, deve-se encontrar 28 pontos (medianas) dentre os 232, de tal forma que a soma das distâncias de cada ponto do grafo à mediana mais próxima seja mínima. Da mesma forma os 28 setores foram agrupados em 4 grandes áreas, cada uma abrangendo 7 setores, uma área para cada supervisor.

Para isso, utilizou-se o Algoritmo de T&B e as meta-heurísticas AG, BT e suas combinações. Todos os algoritmos foram testados com as possíveis variações nos parâmetros, dentro de um tempo computacional razoável até que não surgisse uma melhora significativa na solução. As soluções apresentadas neste trabalho foram as melhores encontradas durante as simulações.

Os algoritmos foram implementados em linguagem *Pascal* utilizando o *software DELPHI 7.0*, instalado e processado em um microcomputador *AMD Athlon XP 2400 GHz* com *256 mega-bytes* de memória *RAM*; como sistema operacional utilizou-se o *Windows XP Professional*. Para a formação dos *clusters* (grupos, setores), o modelo matemático apresentado foi resolvido através do *software LINGO 6.0 (Language for Interactive General Optimizer)*. Os resultados obtidos pelo algoritmo de T&B são apresentados na Tabela 1, sendo que a simulação 5 apresentou os melhores resultados, ou seja, o menor número de transmissão.

Tabela 1. Resultados Numéricos das Simulações para o Problema das 28-medianas obtidas pelo Algoritmo de T&B

Simulação	Número de Iterações	Valor Transmissão (km)	Tempo Computacional (s)
1	1160	88,57	3,0
2	1160	88,74	2,9
3	1160	88,61	3,0
4	1160	88,52	3,0
5	928	88,41	2,4

Na inicialização do AG são definidos o número máximo de iterações ($k_{\text{máx}}$) e o número de elementos da população (m), escolhidos aleatoriamente. Fixou-se o valor de $k_{\text{máx}}$ em 1.000, valor este definido após vários testes e julgado como razoável, pois não comprometeu o tempo computacional, levando a uma solução satisfatória. O valor de m variou de 75 a 200 nas simulações apresentadas neste trabalho.

O processo de geração de novas populações utilizado foi o chamado AG *steady-state*, que se caracteriza em criar apenas um indivíduo de cada vez, podendo este ser repassado (ou não) para geração seguinte dependendo do seu valor de *fitness*. Com relação aos operadores de cruzamento optou-se pelo *crossover* simples, sorteando-se uma posição aleatória nos cromossomos pais trocando-se o material genético a direita deste ponto sorteado, dando origem aos cromossomos filhos. Quanto a mutação realizou-se a chamada mutação por troca simples. Os melhores resultados obtidos pelo AG estão apresentados na Tabela 2, dentre os quais a simulação 2 foi a melhor, com pouca diferença em relação as demais.

Tabela 2. Resultados Numéricos das Simulações para o problema das 28-medianas obtidas pelo AG

Simulação	Número de Iterações	Tamanho População	Valor Transmissão (km)	Tempo Computacional (s)
1	1000	75	108,58	2,4
2	1000	100	107,17	2,9
3	1000	125	107,95	4,6
4	1000	150	107,23	6,8
5	1000	200	108,78	7,7

O algoritmo de BT inicia com a definição do Tempo Tabu (número de iterações que o movimento permanece na lista tabu) e da Estabilidade (número máximo de iterações sem melhoria na solução). Os resultados apresentados na tabela 3 são os melhores obtidos nas simulações, sendo o da simulação 4, a melhor.

Tabela 3. Resultados Numéricos das Simulações para o problema das 28-medianas obtidas pelo algoritmo BT

Simulação	Tempo Tabu (iterações s)	Estabilidade (iterações)	Número de Iterações	Valor Transmissão (km)	Tempo Computacional (s)
1	10	5	928	88,66	3,6
2	10	10	928	88,51	3,6
3	10	50	5572	88,80	19,6
4	15	5	1392	88,17	5,2
5	15	10	1392	88,26	5,2
6	20	5	928	88,70	3,6
7	30	5	928	88,54	3,6
8	40	5	928	88,64	3,5

Definidos os resultados apresentados nas tabelas 1, 2 e 3, procedeu-se às "combinações" dos algoritmos. Fez-se, inicialmente, uma combinação entre o AG e o algoritmo de T&B, ou seja, a partir da solução final obtida pelo AG, aplica-se o T&B. Para o AG fixou-se a solução obtida na simulação 2 contida na tabela 2 e, então, aplicou-se o algoritmo de T&B; os resultados encontram-se na tabela 4. Nesta tabela 4, a melhor solução foi obtida na simulação 1.

Fez-se, em seguida, uma combinação dos algoritmos BT e de T&B, ou seja, a partir da solução final obtida pelo algoritmo BT, aplica-se o T&B. Para a BT fixou-se a solução obtida na simulação 4 contida na tabela 3 e, então, aplicou-se o algoritmo de T&B; os resultados encontram-se na tabela 5. A melhor solução foi obtida na simulação 5.

Tabela 4. Resultados Numéricos das Simulações para o problema das 28-medianas obtidas pelos algoritmos AG e T&B combinados

Simulação	AG			T&B		
	No. Iterações	Valor Transmissão (km)	Tempo (s)	No. Iterações	Valor Transmissão (km)	Tempo (s)
1	1000	109,88	4,1	1160	88,31	2,7
2	1000	107,30	3,3	928	89,17	2,2
3	1000	110,58	3,9	1392	88,94	3,3
4	1000	108,68	4,1	1624	88,94	3,8
5	1000	109,13	3,4	928	88,51	2,3

Tabela 5. Resultados Numéricos das Simulações para o problema das 28-medianas obtidas pelos algoritmos BT e T&B combinados

Simulação	BT			T&B		
	No. Iterações	Valor Transmissão (km)	Tempo (s)	No. Iterações	Valor Transmissão (km)	Tempo (s)
1	928	88,51	3,6	232	88,51	0,4
2	382	90,28	1,7	928	89,01	2,0
3	928	88,36	3,7	232	88,36	0,4
4	467	89,03	2,0	696	88,24	1,4
5	467	89,60	2,0	928	88,21	1,9

Em resumo, os valores de transmissão e os tempos computacionais obtidos nas melhores simulações das 5 propostas apresentadas anteriormente, podem ser observados comparativamente na tabela 6 apresentada a seguir.

Tabela 6. Comparação dos Valores de Transmissão e dos Tempos Computacionais obtidos nas 5 propostas apresentadas

Propostas Apresentadas	Valor de Transmissão (km)	Tempo Computacional (s)
Proposta 1: Algoritmo (T&B)	88,41	2,4
Proposta 2: Algoritmo (AG)	107,17	2,9
Proposta 3: Algoritmo (BT)	88,17	5,2
Proposta 4: Algoritmos (AG+T&B)	88,31	6,8
Proposta 5: Algoritmos (BT+ T&B)	88,21	3,9

Após a determinação das 28-medianas, empregou-se o modelo matemático, apresentado na seção 3.2, para formação dos *clusters* em torno de cada mediana, obtendo-se, desta forma, os 28 setores de fiscalização.

Para que o trabalho dos agentes fiscais fosse distribuído de maneira uniforme, ou seja, cada fiscal atendendo aproximadamente o mesmo número de vagas (capacidade C_i , $i=1, \dots, 232$), foi feito o seguinte cálculo: dividiu-se o somatório do número total de vagas (V_i) multiplicado pelo valor da taxa de ocupação de cada trecho (T_i), por 28 (número de setores), obtendo a capacidade aproximada de cada mediana, ou seja:

$$C_i = \frac{\sum_{i=1}^{232} V_i \cdot T_i}{28}$$

Cada um dos 232 pontos por sua vez, possui também uma demanda (D_i) que pode ser obtida pelo produto do número de vagas do trecho (V_i) pela sua taxa de ocupação (T_i), ou seja:

$$D_i = V_i \cdot T_i$$

As taxas de ocupação dos trechos foram divididas em 3 categorias: alta (1), considerando uma taxa de 100% de ocupação, média (2), com 60% de ocupação e baixa (3) com 30% de ocupação. Estas taxas de ocupação foram obtidas de maneira empírica, pois existem diversos fatores que podem alterá-las (horários de maior movimento no mesmo dia, dias de maior movimento na semana, dentre outros). O modelo matemático implementado visa designar os pontos às medianas mais próximas, respeitando as suas capacidades.

Para a formação dos agrupamentos (setorização/*clusterização*) utilizou-se a melhor solução obtida dentre todas as simulações anteriormente apresentadas para o problema das 28-medianas, que foi a obtida pelo algoritmo BT (proposta 3 da tabela 6). As 28-medianas obtidas, para esta simulação, são: 2, 6, 12, 18, 32, 39, 55, 59, 61, 73, 78, 80, 83, 110, 111, 117, 137, 143,

158, 165, 171, 173, 191, 202, 209, 220, 221, 231, dentre os 232 pontos, todos apresentados na figura 1 em anexo. Para a formação dos grupos (*clusters*) foi implementado o modelo matemático *software LINGO*, cujos resultados obtidos também estão apresentados na figura 1.

Finalmente, após a formação dos 28 *clusters*, realizou-se a distribuição destes em 4 grandes áreas. Novamente fez-se necessária a determinação de 4-medianas dentre as 28-medianas determinadas anteriormente. A definição destas ocorreu seguindo o mesmo procedimento. Em CAPRI, 2005, encontra-se um maior detalhamento do procedimento adotado e ilustrações adicionais para o caso abordado.

5. Conclusões

O Estacionamento Rotativo Regulamentado (Zona Azul, na cidade de Ponta Grossa, PR) tem a função de garantir uma rotatividade de veículos em estacionamentos públicos, pois em grandes centros urbanos é praticamente impossível encontrar vagas em certas horas do dia, ou em certos dias da semana. Para que esta rotatividade ocorra é necessária uma limitação de tempo para cada usuário indicada nos chamados cartões de estacionamento. Para garantir a utilização de tais cartões, tem-se os fiscais de estacionamento, que são distribuídos em setores de fiscalização, para realizar os seus trabalho de forma eficiente.

Na distribuição destes fiscais em setores, são elaborados alguns mapas que, atualmente, são feitos de forma empírica, tentando distribuir aos mesmos, de maneira uniforme, os trechos de quadra, considerando regiões de maior concentração de veículos ou de maior ou menor rotatividade. Pelos dados obtidos para realização deste trabalho (dados de Ponta Grossa) observa-se que esta distribuição e a elaboração dos mapas não são satisfatórias. Certos setores ficam sobrecarregados, assim como outros ficam ociosos. Além disto, em diversas situações estes mapas precisam sofrer alterações, seja pela ampliação das áreas de estacionamento regulamentado ou redução de alguns trechos onde, com o tempo, verifica-se (ou não), respectivamente, a necessidade destes estacionamentos.

A proposta do trabalho é, então, utilizando técnicas matemáticas apropriadas, obter de forma eficaz, eficiente e automática a distribuição dos trechos de quadra em setores, considerando uma distribuição uniforme de trabalho entre os fiscais, minimizando a distância a ser percorrida pelos mesmos em cada setor. Isto garante uma fiscalização eficiente de forma a proporcionar aos usuários destes estacionamentos uma maior disponibilidade de vagas, devido ao aumento da rotatividade.

Neste trabalho foram comparados, inicialmente, os resultados obtidos em 5 propostas (tabela 6), para a determinação das p -medianas, com $p = 28$, mostrando que alguns algoritmos tem maior ou menor eficiência, dependendo do caso. Neste trabalho o algoritmo de Busca Tabu mostrou uma leve superioridade em relação aos demais. Vale salientar que, como a comparação entre os algoritmos levou em consideração apenas as simulações com melhores resultados, a mesma não é definitiva. Já para a formação dos *clusters* (28 setores), um modelo matemático, baseado no modelo de transportes e de designação, revelou-se de fácil implementação e muito eficiente.

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, pois, em segundos, a partir de um mapa digitalizado da região e das coordenadas dos trechos, o programa desenvolvido elaborava todos os mapas de setores e áreas a serem fiscalizados, pelos orientadores e supervisores, respectivamente, permitindo que qualquer alteração seja feita de forma automática sem causar maiores transtornos.

A tabela 7, a seguir, compara a distribuições das vagas nos 28 setores atuais com os 28 setores propostos após aplicação das técnicas. No número de vagas apresentados na tabela para cada setor, já estão sendo consideradas as taxas de ocupação dos trechos. Esta tabela 7 confirma que na solução adotada atualmente não existe uniformidade na distribuição das vagas nos setores. Se por um lado existem setores ociosos, como o setor 7 e o setor 23, com menos de 40 vagas a serem atendidas em cada um deles, por outro lado existem setores sobrecarregados como, por exemplo, o setor 8, com 97 vagas. Sabe-se que esta má distribuição afeta diretamente na

fiscalização destes setores. Já na solução otimizada, nota-se que a uniformidade na distribuição das mesmas é bastante satisfatória.

Tabela 7. Comparação na Distribuição das Vagas: Solução Atual (empírica) e Solução Otimizada (com a aplicação de algoritmos da Pesquisa Operacional)

Setores	SOLUÇÃO ATUAL		SOLUÇÃO OTIMIZADA	
	No. Vagas atendidas	No. Trechos atendidos	No. Vagas atendidas	No. Trechos atendidos
1	89	10	44	4
2	86	12	63	7
3	75	7	67	7
4	49	8	59	9
5	63	6	67	9
6	50	6	68	7
7	36	9	61	14
8	97	9	50	4
9	79	8	59	6
10	75	7	68	6
11	43	11	63	6
12	51	11	65	7
13	49	7	55	12
14	61	12	67	8
15	40	7	64	12
16	69	7	59	16
17	77	7	66	6
18	66	6	67	6
19	71	6	68	12
20	44	10	67	9
21	56	6	67	6
22	74	7	65	7
23	37	9	66	9
24	71	7	69	12
25	55	6	67	10
26	55	9	67	9
27	87	12	68	4
28	86	10	68	8

Referências:

BARCELOS, F. B. (2004). *Localização de Escolas do Ensino Fundamental com Modelos Capacitado e não Capacitado: Caso de Vitória, ES*. Pesquisa Operacional, v. 24, n. 1, p. 133-149.

BORNSTEIN, C. T. (2004). *An ADD/DROP Procedure for the Capacitated Plant Location Problem*. Pesquisa Operacional, v. 24, n. 1, p. 151-162.

CHRISTOFIDES, N. *Graph Theory – An Algorithmic Approach*. New York: Academic Press, 1975.

CAPRI, M.A. *Otimização no Serviço do Estacionamento Regulamentado utilizando Técnicas da Pesquisa Operacional*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, UFPR, Curitiba, PR, 2005.

CORRÊA, E.S.; STEINER, M.T.A.; FREITAS, A.A. & CARNIERI, C. (2004). *A Genetic Algorithm for Solving a Capacitated P-Median Problem*. Numerical Algorithms, Netherlands, v. 35, p. 373-388.

COSTA, D.M.B.; STEINER, M.T.A.; CARNIERI, C.; ZAMBONI, L.V.S. & SILVA, A.C.L. (2001). *Técnicas da Pesquisa Operacional na Otimização dos Serviços Postais*. Gestão & Produção, São Carlos, SP, v.8, n.1, p. 37-55.

- GONÇALVES, S.M.; STEINER, M.T.A. & ZAMBONI, L.V.S. (2005). *Uma Metodologia para o Problema do Roteamento de Veículos – um Estudo de Caso para a Distribuição de Água Mineral*. XXXVII SBPO, Gramado, RS.
- LOBO, D. S. Localização de Unidades de Educação Infantil: uma aplicação para creches municipais de Florianópolis. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis (UFSC), Florianópolis, SC, 1998.
- PIZZOLATO, N. D. (2004). *Localização de Escolas Públicas: Síntese de Algumas Linhas de Experiências no Brasil*. Pesquisa Operacional, Vol. 24, n. 1, p. 111-131.
- ROSÁRIO, R.R.L.; CARNIERI, C.; STEINER, M.T.A.; FLEISHFRESSER, S.A. & CORRÊA, E.S. (2001). *Aplicação do Problema das p-medianas para determinar a Localização de Unidades de Saúde 24 Horas*. XXXIII SBPO, Campos de Jordão, SP, p. 1155-1166.
- SMIDERLE, A.; STEINER, M.T.A. & WILHELM, V.E. (2004). *Técnicas da Pesquisa Operacional aplicadas a um Problema de Cobertura de Arcos*. TEMA (Tendências em Matemática Aplicada), SBMAC, v. 5, n.2, p. 347-356.
- TEITZ, M. B.; BART, P. (1968). *Heuristics Methods for Estimating the Generalized Vertex Median of a Weighted Graph*. Operations Research, v.16, p. 955-961.

ANEXO

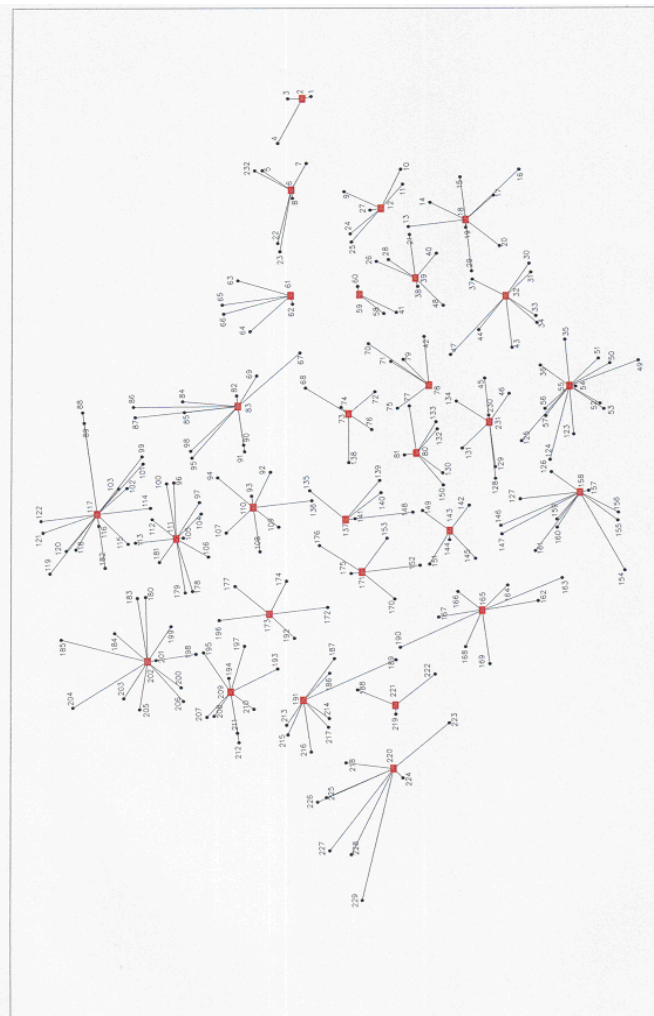


Figura 1. Os 204 pontos de demanda, com destaque às 28-medianas, formando 28 setores (clusters)