

PROPOSTA DE UM MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO E ALOCAÇÃO DE PONTOS DE COLETA SELETIVA¹

Lucas Daniel Del Rosso Calache^{a*}, Victor Claudio Bento Camargo^a

^a*Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM, Uberaba-MG, Brasil*

Resumo

O presente trabalho aborda um estudo de implantação de uma estratégia de recolhimento de material reciclável com foco no problema de localização de contentores (PEVs - Ponto de Entrega Voluntária) para coleta seletiva. A utilização dos PEVs proporciona facilidade da coleta, reduzindo custos desnecessários quando comparado à coleta porta a porta. Modelos matemáticos de localização de facilidades foram utilizados para auxiliar na decisão de localização dos PEVs considerando as distâncias entre as interseções das ruas, buscando um atendimento satisfatório para que a população esteja disposta a aderir. Os resultados dos modelos e análise de cenários foram obtidos com auxílio do resolvidor AMPL/CPLEX. De acordo com os resultados, a utilização da abordagem incremental, em que, o planejamento de um bairro deve considerar os PEVs já instalados nos bairros vizinhos, é indicada para a implantação do método de coleta por PEVs.

Palavras-chave: Localização de Facilidades, PEV, Modelagem Matemática.

Abstract

This study discusses the implementation of a strategy of gathering recyclable material focusing on the problem of container location for selective collection programs. The use of PEVs provides ease of collection, reducing unnecessary costs when compared to collecting door to door. Mathematical models are used to determine the container locations taking into account the street intersections as location points and satisfactory distance for the people. Results for model and scenario analysis were obtained by AMPL/CPLEX solver. Based on the results, the use of the incremental approach, in which the planning of a district considers the PEVs already installed in the neighboring districts, is indicated for the implementation of the recycling method with PEVs.

Keywords: Facility Location, Containers, Mathematical Modeling.

*Autor para correspondência: e-mail: lucascalache@gmail.com

¹Todos os autores assumem a responsabilidade pelo conteúdo do artigo.

1. Introdução

Uma das consequências do crescimento da população mundial e do crescimento da indústria é o aumento da quantidade de resíduos orgânicos e inorgânicos na sociedade. A quantidade de resíduos produzidos no Brasil aumentou de 213 mil toneladas por dia em 2007 para 273 mil toneladas por dia em 2013 (Macedo, 2013). Por projeção, um brasileiro estava produzindo 1,4 kg de lixo por dia em 2014. Dado esse aumento, o tratamento dos resíduos produzidos se faz necessário, em especial os que podem ser tratados por reciclagem. Porém, devem ser oferecidos meios para que a população possa dar um destino correto ao lixo separado, sendo possível reaproveitar os resíduos descartados e diminuir o impacto do processo de consumo. Dentre os benefícios gerados pela adoção da reciclagem, podemos citar a redução do desperdício dos recursos naturais, a geração de novos empregos e oportunidades de negócio, a diminuição do volume de resíduos nos aterros sanitários e lixões (garantindo melhor aproveitamento da área) e maior vida útil dos materiais.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, os instrumentos da Política Nacional de Resíduos Sólidos buscam alcançar um índice de reciclagem de resíduos de 20% em 2015. Segundo IPEA (2013), o país perde cerca de R\$ 8 bilhões por ano por deixar de reciclar os resíduos que acabam sendo encaminhados aos aterros e lixões. De acordo com Peixoto (2006), um exemplo de impacto com a reciclagem são as latas de alumínio, em que 96,2% da produção brasileira são reciclados, resultando em uma redução de aproximadamente 65% nas emissões de metano e 80% de dióxido de carbono.

É evidente a preocupação cada vez maior com o desenvolvimento sustentável, que visa o aproveitamento dos recursos disponíveis sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. Os benefícios do desenvolvimento sustentável abrangem a dimensão ambiental, social e econômico, assim como detalhado por Finkbeiner *et al.* (2010). Segundo a lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a gestão dos resíduos passa a ser obrigatória para a administração pública do município, tendo como instrumentos, a coleta seletiva e a criação de cooperativas.

De acordo com o guia de implantação de coleta seletiva em municípios (Barki, 2012), existem dois modelos básicos de coleta seletiva: remoção porta a porta ou a utilização de postos de entrega voluntária (PEVs). A coleta porta a porta consiste na coleta dos materiais recicláveis gerados pelos domicílios, numa atividade semelhante à da coleta regular executada pela maioria dos municípios brasileiros. Nos dias e horários determinados, os veículos de coleta passam em frente aos domicílios e removem o material separado pelos moradores. Essa

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

coleta garante uma aderência maior da população devido à comodidade de descarte do material para os usuários.

Na utilização de PEVs, os veículos não se deslocam de domicílio em domicílio. A própria população é responsável por depositar os materiais recicláveis em pontos predeterminados pela administração pública, onde são acumulados para remoção posterior. Esse sistema proporciona facilidade na coleta, reduzindo percursos dos veículos coletores (especialmente em bairros com baixa densidade populacional, como em zonas rurais), e evitando trechos improdutivos na coleta porta a porta.

Os PEVs são contentores de plástico ou metal instalados em um ponto fixo e devem ser apropriados para receber resíduos recicláveis separados por tipo. A instalação dos PEVs permite também a exploração do espaço para publicidade e eventual obtenção de patrocínio, além de permitir a separação e descarte dos recicláveis por tipos, dependendo do estímulo educativo e do tipo de contentor, o que facilitaria a triagem posterior. Dentre as desvantagens, podemos citar a possibilidade de depredação das instalações por vandalismo e a necessidade de empenho da população em conduzir seus resíduos recicláveis até os pontos predeterminados, podendo resultar em uma menor aderência dos moradores (Peixoto, 2006).

Na cidade de Uberaba/MG, não é comum a utilização de tais contentores, prevalecendo a coleta porta a porta realizada por cooperativas. A decisão de onde localizar os PEVs pode atender alguns requisitos, por exemplo, a distância máxima percorrida pela população até o PEV e facilidade de acesso (González-Torre *et al.*, 2003). O problema de localização dos contentores para coleta seletiva de material reciclável tem especial relevância, pois toda cidade deve obrigatoriamente realizar tratamento dos resíduos urbanos e a alocação desses pontos deve satisfazer uma série de restrições que variam de cidade para cidade.

De acordo com Loureiro *et al.* (2012), os problemas de localização de facilidades (tais como contentores) são importantes e servem como base para a decisão da localização de uma facilidade que atenderá outros pontos de localização fixa, de forma a otimizar um critério em questão. Tais problemas também são conhecidos como localização-alocação, já que, simultaneamente, facilidades são localizadas e clientes são alocados às facilidades.

Segundo relatório do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2012), a população urbana de Uberaba é de 295.863 habitantes (de um total de 302.623), onde todos são atendidos pela coleta de resíduos sólidos 2 ou 3 vezes por semana. A quantidade de resíduos coletados através de caminhões da empresa terceirizada pela prefeitura foi de 79.336 toneladas durante todo o ano de 2012. O valor pago pela coleta de resíduos foi de R\$ 91,15

por tonelada, e para sua disposição final, foram desembolsados mais R\$ 32,57 por tonelada, resultando em um gasto anual de aproximadamente 10 milhões de reais.

Apesar do grande volume recolhido de resíduos em 2012, apenas 200 toneladas de material reciclável foram devidamente separadas por catadores com apoio da prefeitura. Isso representa cerca de 0,25 % do total de resíduos recolhidos e 0,63 % do total de material que poderia ser reaproveitado. Assim, como apresentado anteriormente, percebe-se a necessidade da implantação de um sistema que permita aumentar o reaproveitamento dos resíduos, buscando diminuir custos com coleta e disposição final de materiais que podem gerar renda para o município, reduzirem os impactos ambientais e ainda se adequar à lei dos resíduos sólidos.

Este trabalho visa estudar o problema de localização e alocação de pontos de coleta seletiva utilizando PEVs. Para isso, modelos matemáticos de programação linear inteira foram estudados e implementados. O resultado esperado é obter um método sistêmico para apoio à decisão na localização de PEVs para coleta seletiva em um perímetro urbano e a alocação dos pontos atendidos por cada ponto de coleta. Algumas estratégias de execução do planejamento de localização e alocação são investigadas.

Na Seção 2, apresentamos o desenvolvimento do estudo, sendo que em 2.1 é apresentada sua taxonomia e em 2.2 os modelos matemáticos utilizados e variações da execução analisadas. Na Seção 2.3, apresentamos os resultados obtidos nos testes realizados com a modelagem matemática. Por fim, na Seção 3, as considerações finais e oportunidades de estudos futuros são apresentadas.

2. Desenvolvimento

A localização e alocação de facilidades é um problema de nível estratégico de decisões que surge em diversas empresas e órgãos governamentais. Ferramentas da Pesquisa Operacional dentro da área de logística e transportes são utilizadas para a modelagem e solução de tais problemas que são essenciais para o auxílio na tomada de decisões estratégicas que atenderão os objetivos das entidades (Loureiro *et al.*, 2012).

Segundo Arakaki (2003), os problemas de localização de facilidades são necessários para servir de apoio na decisão da escolha adequada de posicionamento de fábricas, depósitos, escolas, hospitais, antenas, pontos de coleta seletiva, etc. Já a alocação estratégica, refere-se à atribuição de quem receberá o atendimento das facilidades instaladas. Esses problemas podem ser representados em redes que são formadas por pontos (vértices que representem possíveis

localizações de posicionamento da facilidade) e linhas (arcos que podem representar vias públicas, conexões de água, telefonia, etc.), como apresentado na Figura 1.

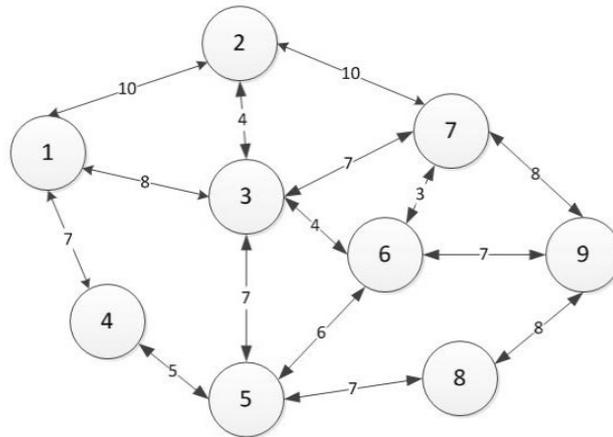


Figura 1 – Exemplo de rede direcional com distâncias entre os pontos.
Fonte: Própria autoria.

2.1 Taxonomia do Problema

Algumas variações do problema de localização/alocação de facilidades com aplicação nas operações urbanas são apresentadas por Loureiro *et al.* (2012), dentre elas, o problema de p-medianas e p-centros. No problema de p-medianas, um número pré-especificado de facilidades deve ser localizado minimizando a distância média, tempo ou custo de viagem de uma facilidade em relação aos usuários. Uma classificação das questões que envolvem a localização de instalações de serviços é apresentada na Figura 2.

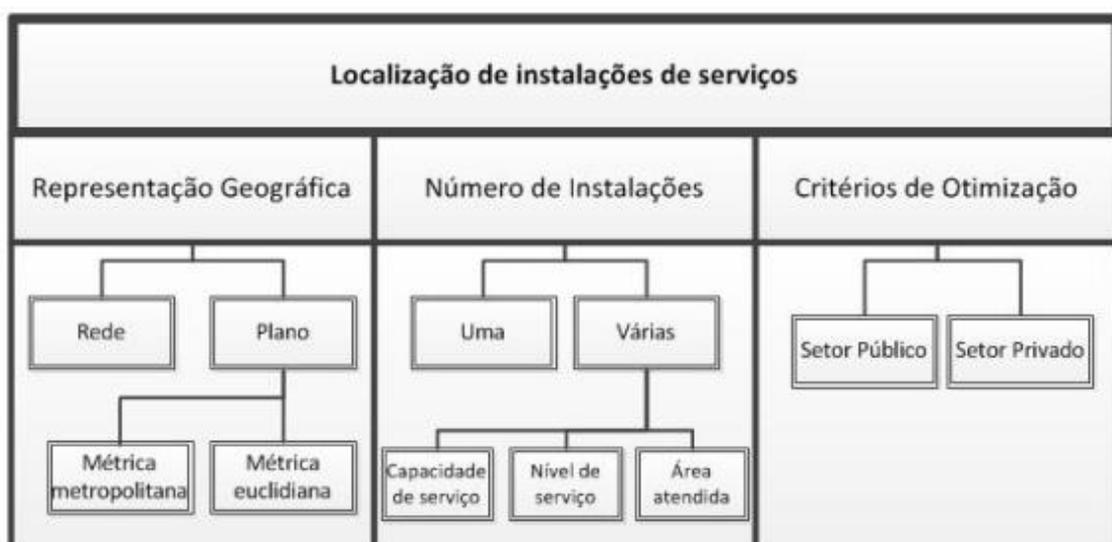


Figura 2 - Classificação das questões de localização das instalações.
Fonte: Adaptado de Fitzsimmons e Fitzsimmons (2010).

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

A taxonomia do problema de localização das facilidades para coleta de material reciclável abordada no trabalho pode ser classificada como uma representação geográfica em rede, com várias instalações limitadas pela capacidade de serviço e busca-se otimizar um critério dentro do setor público. A classificação foi determinada devido aos pontos de instalação candidatos serem pré-selecionados. Caso não existam pontos pré-estabelecidos, o ideal seria utilizar um modelo gravitacional, que busca determinar a posição geográfica adequada para a instalação utilizando métrica metropolitana ou euclidiana (Fitzsimmons e Fitzsimmons, 2010).

No setor privado, os critérios adotados para a localização das facilidades são guiados pela necessidade de atrair o maior número de clientes, obtendo-se um equilíbrio entre o custo de construção e de operação das instalações e o custo de transporte, sendo que, a distância pode ser uma barreira que restringe a demanda. Já no setor público, os critérios adotados são mais difíceis de serem definidos, devido à dificuldade de medição dos benefícios em unidade monetária em relação aos investimentos. Nesse caso, a distância média percorrida pelos usuários até as instalações é um indicador muito popular, minimizando a distância média total percorrida, com uma restrição no número de instalações. O problema também pode ter como restrição adicional a limitação da distância máxima a ser percorrida pelo usuário (Fitzsimmons e Fitzsimmons, 2010).

Para que a coleta seletiva com PEVs tenha uma participação considerável da população por meio de caminhada, Peixoto (2006) afirma que a distância recomendada para o usuário é de 300 metros, podendo chegar ao máximo de 500 metros, resultando em uma caminhada de até 5 minutos até o PEV. Para localizar os PEVs considerando essa restrição, deve-se analisar os pontos candidatos a receber os contentores para assegurar que a área de aplicação do estudo esteja coberta de forma homogênea pelo serviço. Para identificar os pontos que receberão os contentores, podemos utilizar o algoritmo dos caminhos mínimos de Floyd (Arenales *et al.*, 2006) obtendo-se a matriz das mínimas distâncias entre todos os vértices e calculando a matriz de distâncias entre todos os vértices e pontos. Essa solução é aconselhada quando a geografia da área estudada não possui grandes variações como, por exemplo, grandes aclives que podem causar maior exaustão no usuário, diminuindo assim a distância que o mesmo estará disposto a caminhar até os PEVs.

Fundamentado nos métodos pesquisados de localização/alocação de um serviço público é possível determinar a localização dos contentores de coleta seletiva e estimar a quantidade necessária de pontos de coleta. Tendo-se uma representação dos possíveis pontos

de instalação das facilidades, pode-se calcular as distâncias entre todos os pontos através do algoritmo de Floyd, para assim, podermos utilizar um método de solução que apoiará a decisão de localização.

2.2 Modelos Matemáticos Propostos para Localização e Alocação

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma análise de localização e alocação de pontos de coleta seletiva através de modelos matemáticos de programação linear inteira. A localização dos contentores requer recursos públicos. Quando os recursos não são limitantes, os PEVs devem ser localizados obedecendo a uma distância máxima à população a ser atendida. Caso contrário, o número de PEVs instalados é limitado e a distância total percorrida por toda a população é minimizada. As interseções das ruas (marcadas e enumeradas) são consideradas pontos de demanda e também os pontos possíveis de localização dos PEVs. Buscamos uma solução de localização e alocação adequada para realizar as instalações atendendo restrições e objetivos impostos. As soluções encontradas são uma base inicial para a tomada de decisão do analista, pois outros fatores devem ser considerados, principalmente quando os dados são aproximações da realidade. Os dados utilizados no presente estudo foram coletados através de mapas que representam a região estudada. Por ser uma representação, as distâncias são consideradas aproximações.

2.2.1 Modelo Utilizado para Encontrar o Número Mínimo de PEVs

Ao encontrar o número mínimo de pontos de coleta, busca-se atender a população de forma satisfatória, segundo uma distância máxima a ser estipulada para que haja a participação dos usuários. Todos os pontos de demanda também são candidatos a ser pontos de instalação. As distâncias entre todos os pontos de demanda são os dados de entrada. O modelo matemático utilizado é apresentado a seguir. Considere:

Índices

- $i, j = 1, \dots, B$ possíveis pontos de instalação/demanda;
Variáveis de decisão
- P : Número de PEVs a ser instalados;
- PEV_i : receber o valor 1 caso um PEV seja instalado no ponto i ou 0 caso contrário;
- A_{ij} : é igual a 1 se o ponto i é atendido pelo PEV instalado no ponto j , e 0 caso contrário.

Parâmetros

- d_{ij} : é igual a 1 se a distância máxima entre os pontos i e o PEV_j é obedecida, e 0 caso contrário.

Função Objetivo:

$$\text{Minimizar } P = \sum_{i=1}^B PEV_i \quad (2.1)$$

Restrições:

$$d_{ij} * PEV_j \geq A_{ij} \quad \forall i, j \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^B A_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2.3)$$

$$A_{ij}, PEV_i \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (2.4)$$

O modelo apresentado acima é uma adaptação do modelo de localização/ alocação utilizado em Peixoto (2006). A função objetivo (2.1) visa minimizar o número de PEVs necessários para atender toda a população. As restrições (2.2) e (2.3) garantem que cada ponto seja atendido por pelo menos um PEV e que todos os pontos serão atendidos. As restrições (2.4) são condições de domínio das variáveis.

2.2.2 Modelo para Minimizar a Distância Total Percorrida pela População com Restrição de Distância Máxima

Levando em consideração o mínimo número de PEVs necessários para atender toda a população, como definido na seção anterior, um modelo matemático pode ser utilizado para a localização dos PEVs de modo que a distância total percorrida até os contentores por toda a população atendida seja a menor possível. O número de PEVs utilizados será igual ao encontrado no modelo apresentado na Seção 2.2.1, buscando atender também a restrição de distância máxima estipulada. O modelo utilizado é apresentado a seguir:

Indicador de desempenho

- S_i : soma das distâncias dos pontos atendidos pelo PEV localizado no ponto i .

Parâmetros

- P : Número de PEVs a ser instalados (encontrado no modelo anterior);
- M : Distância máxima estimada para ser percorrida pela população;
- y_{ij} : Distância entre o ponto i e o ponto j .

Função Objetivo:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^B S_i \quad (2.5)$$

Restrições:

$$S_i = \sum_{j=1}^B y_{ij} \cdot A_{ij} \quad \forall i \quad (2.6)$$

$$\sum_{j=1}^B PEV_j = P \quad (2.7)$$

$$A_{ij} \leq PEV_j \quad \forall i, j \quad (2.8)$$

$$\sum_{i=1}^B A_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (2.9)$$

$$y_{ij} \cdot A_{ij} \leq M \quad \forall i, j \quad (2.10)$$

$$PEV_j, A_{ij} \in \{0; 1\} \quad \forall i, j \quad (2.11)$$

A função objetivo (2.5) minimiza a soma total da distância entre os PEVs instalados e os pontos que serão atendidos. As equações (2.6) definem a soma das distâncias entre cada PEV instalado e os pontos atendidos. A restrição (2.7) define que a somatória do número de PEVs instalados é igual ao número de PEVs disponíveis. Nas restrições (2.8) e (2.9), cada ponto deve ser atendido por um PEV. Em (2.10) a distância máxima é limitada para o atendimento dos usuários. As restrições (2.11) são condições de domínio das variáveis. Vale ressaltar que a resposta do modelo (2.1)-(2.4) é uma solução viável para o modelo (2.5)-(2.11), porém a distância total percorrida pode não ser mínima.

2.2.3 *Modelo para Minimizar Distância Total Percorrida*

Caso não haja condições de instalar todos os pontos necessários para atender toda a população com uma distância máxima estipulada, ou seja, P PEVs geram altos custos, o modelo implementado deve ser análogo ao modelo (2.5)-(2.11), porém sem as restrições (2.10) de

distância máxima a ser atendida. Desta forma, todos os usuários serão atendidos por algum PEV, independente da distância. O objetivo é minimizar a distância total percorrida por todos os usuários aos pontos disponíveis. Tal abordagem é usual principalmente em localização de facilidades públicas (Fitzsimmons e Fitzsimmons, 2010).

2.2.4 Hipóteses a Serem Analisadas

Hipóteses sobre os dados do problema serão analisadas para que se possa escolher o melhor método de aplicação dos modelos. Dentre os testes, deve-se verificar:

- I. Possíveis pontos de instalação.
 - T1- Devemos considerar somente as interseções das ruas como possíveis pontos de localização;
 - T2- Devemos utilizar pontos de interseção entre as ruas e pontos intermediários entre as interseções para localizar os contentores.
- II. Ordem do planejamento de localização e alocação. Os bairros estão ordenados em ordem crescente segundo a quantidade de pontos (interseções) em cada um, e essa ordem foi utilizada para a resolução dos modelos.
 - T3- Devemos planejar a localização e alocação dos PEVs para cada bairro individualmente desconsiderando quaisquer pontos instalados nos bairros adjacentes;
 - T4- Devemos planejar a localização e alocação dos PEVs de forma incremental, no qual, um bairro é planejado por vez considerando os pontos de coleta selecionados já planejados (ou instalados) nos bairros adjacentes.
 - T5- Devemos planejar a localização e alocação dos PEVs com todos os bairros de forma conjunta.
 - T6- Devemos planejar a localização e alocação dos PEVs de forma incremental, porém com a ordem de planejamento dos bairros invertida quando comparada a T4.

2.3 Resultados

Para comprovar o método proposto de localização e alocação de pontos de coleta seletiva, analisamos na cidade de Uberaba/MG, a implantação de PEVs no bairro Abadia que é o mais populoso da cidade. Para uma análise mais contundente, as regiões limítrofes também foram analisadas individualmente e em conjunto. A Figura 3 demonstra a localização das regiões

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

estudadas em relação ao bairro Abadia. A Tabela 1 apresenta os dados com o tamanho da população de cada bairro e o número de interseções entre as ruas. A Figura 4 representa todos os possíveis pontos de localização de PEVs para cada bairro analisado.

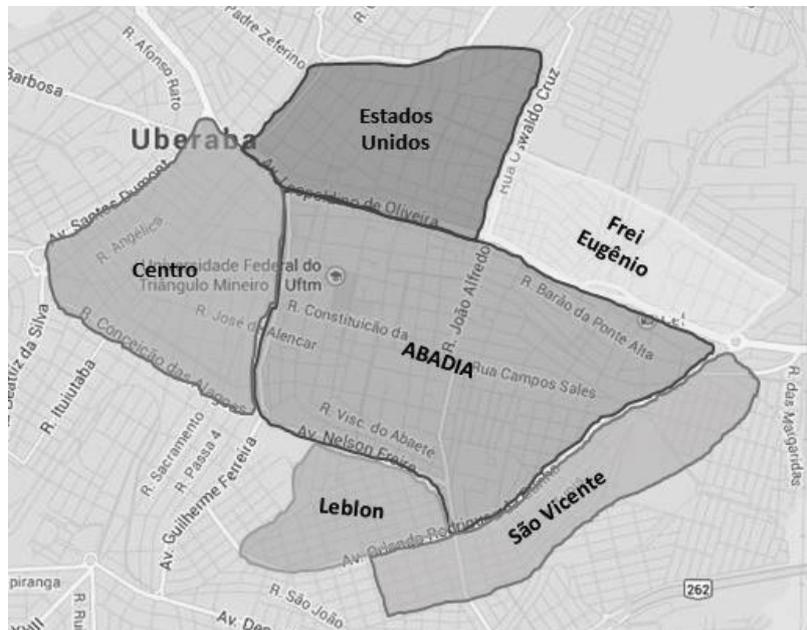


Figura 3 - Bairro Abadia e suas regiões vizinhas estudadas.
Fonte: Adaptado do Google Maps.

Tabela 1: População e pontos analisados em cada bairro.
Fonte: SEDEC (2010), Uberaba, MG.

Bairros	População	Número de interseções
Abadia	31.257	261
São Vicente	13.255	110
Centro	4.918	104
Estados Unidos	16.791	88
Leblon	12.572	64
Frei Eugênio	6.167	62

Os testes computacionais foram realizados utilizando um computador HP Pavilion DM4-1075, Intel Core i5-430M, 2.26 GHz, 4 GB de RAM. Os algoritmos para estruturação dos dados foram codificados na linguagem C. Os modelos matemáticos foram resolvidos utilizando o resolvidor AMPL / CPLEX.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

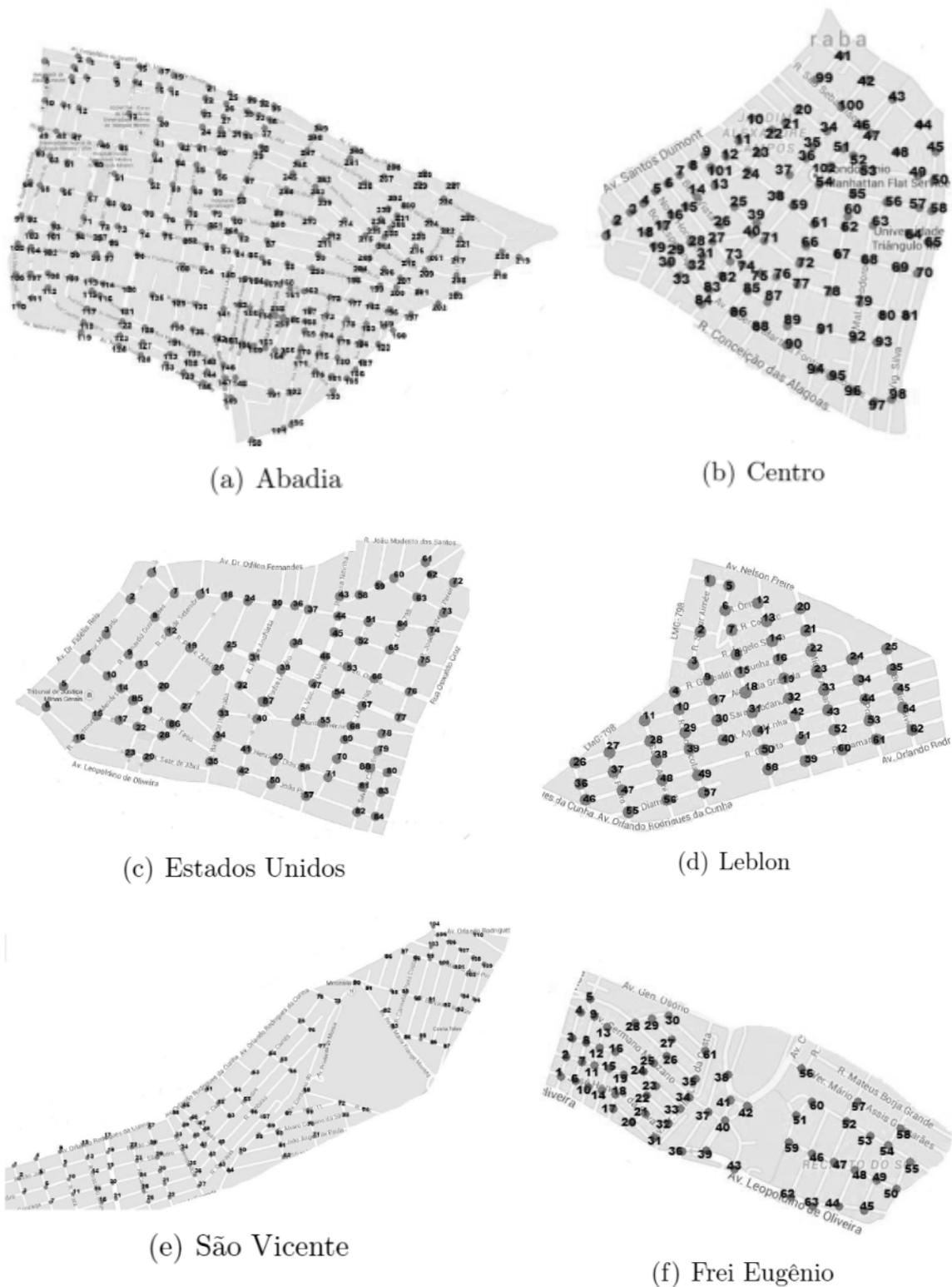


Figura 4 - Possíveis pontos de localização de PEVs
Fonte: Adaptado do Google Maps.

Para a obtenção da matriz y_{ij} de distância entre todos os pontos, primeiro foi necessária a medição de distância entre cada ponto e os pontos imediatamente adjacentes, mantendo as outras distâncias com valor grande. As distâncias mínimas y_{ij} foram encontradas através da implementação do algoritmo de Floyd (Arenales *et al.*, 2006).

A matriz booleana d_{ij} foi obtida através da análise da matriz y_{ij} . Caso a distância entre os pontos i e j seja menor ou igual a distância máxima permitida entre um ponto e um PEV, será atribuído o valor $d_{ij} = 1$, e caso a distância seja maior, o valor atribuído será 0.

2.3.1 Testes para Encontrar o Número Mínimo de PEVs para os Bairros

A Figura 5 apresenta os pontos (nas interseções de ruas) para localização dos contentores para cada bairro planejada individualmente. Nesse caso, o objetivo do teste foi minimizar o número de PEVs instalados, sendo que, a distância máxima percorrida pela população não poderia ser superior a 500 metros. Essa distância foi determinada baseada no referencial teórico, onde Peixoto (2006), afirma que os usuários estão dispostos a caminhar em média 5 minutos para depositar os resíduos recicláveis (aproximadamente 500 metros).

2.3.2 Testes para Minimizar a Distância Total Percorrida pela População com Restrição de Distância Máxima

A estratégia inicial de resolução foi encontrar o número mínimo de PEVs necessários para atender a restrição de 500 metros, buscando assim minimizar os custos de instalação. Em seguida, utilizamos o modelo (2.5)-(2.11) para minimizar a distância total percorrida pela população, respeitando a restrição de distância máxima. Nesse caso, os dados utilizados foram as próprias distâncias obtidas através da implementação do algoritmo de Floyd, o que resultou em um maior tempo de execução quando comparado ao modelo de minimização de PEVs. Porém, o tempo de processamento individual para os bairros não ultrapassou 14 segundos. A Figura 6 apresenta os resultados para esse modelo. Note que o número mínimo de PEVs foi mantido, entretanto, os PEVs estão melhores distribuídos pelos bairros de acordo com a distância total percorrida pela população.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

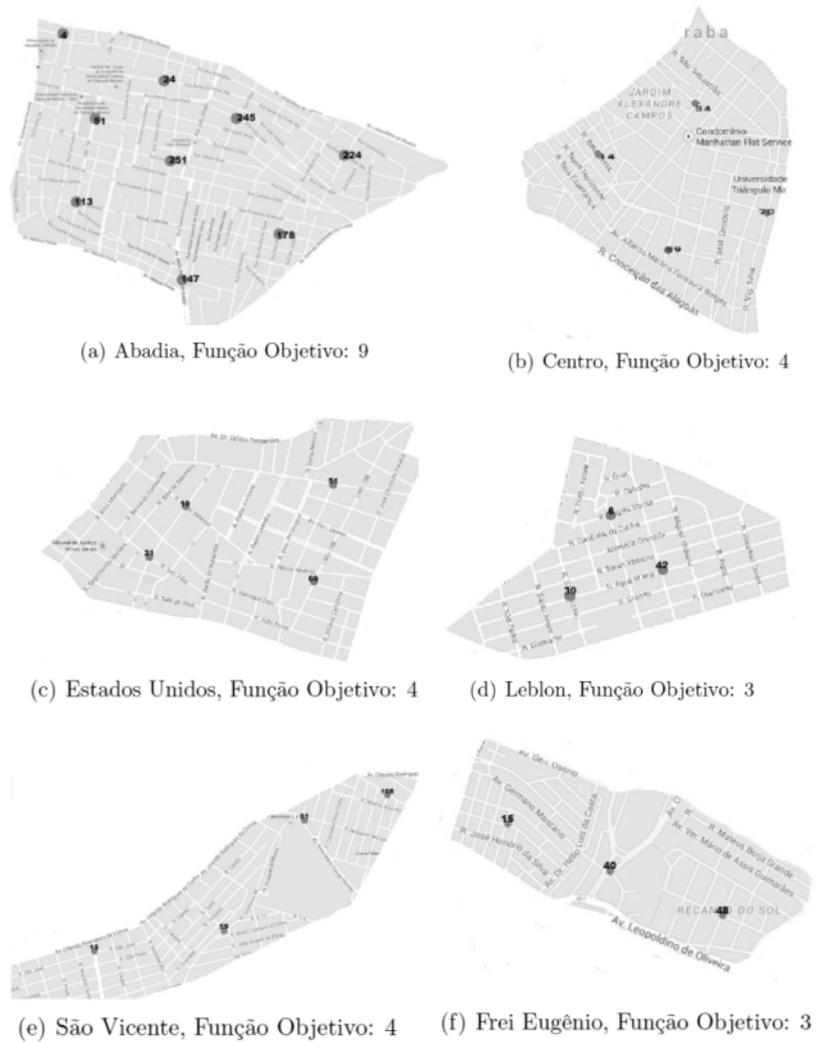


Figura 5 – Resultados do modelo que minimiza o número de PEVs.
Fonte: Adaptado do Google Maps.

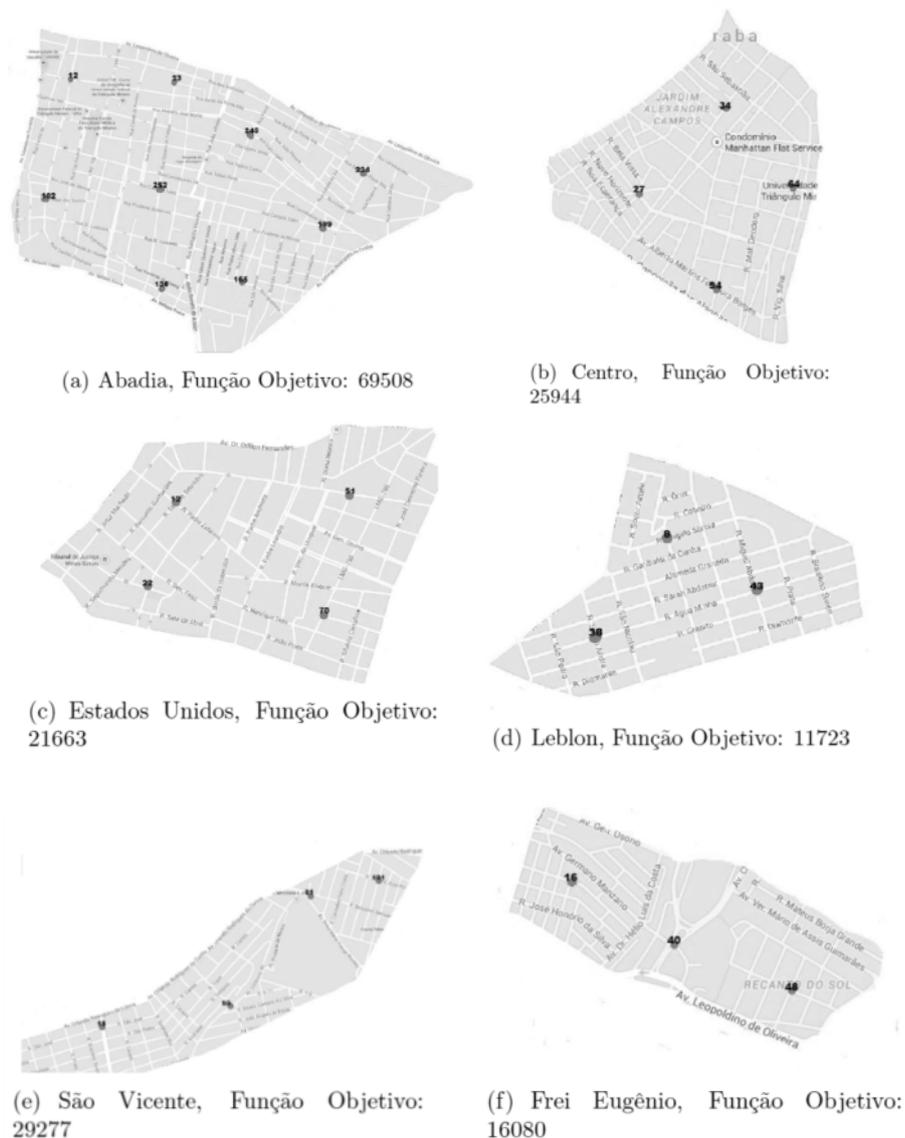


Figura 6 – Resultados da minimização da distância total percorrida pela população com restrição de distância máxima.

Fonte: Adaptado do Google Maps.

2.3.3 Modelo para Minimizar Distância Total Percorrida

O modelo apresentado em (2.1)-(2.4) foi utilizado para encontrar o número mínimo de contentores necessários para atender todos os pontos previamente selecionados dentro de uma distância máxima de 500 metros. Em seguida, utilizando esse número de contentores, aplicamos o modelo (2.5)-(2.11) para determinar a localização dos PEVs com o objetivo minimizar a distância total percorrida pela população sem ferir a restrição de distância máxima estipulada. Porém, nem sempre os recursos iniciais são suficientes para instalar todos os P contentores necessários para atender toda a população com distância máxima limitada.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Nesse caso, é aconselhado utilizar outro modelo no qual não haja a restrição de distância máxima, buscando assim somente minimizar a distância total percorrida entre os pontos.

Para comparação entre as respostas dos modelos, utilizamos o mesmo número de PEVs encontrados nos modelos apresentados nas Seções 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3. A solução obtida entre tais modelos foi um posicionamento diferente dos contentores, sendo que, apenas o bairro Leblon apresentou resultado semelhante, como pode ser visto na Figura 7.

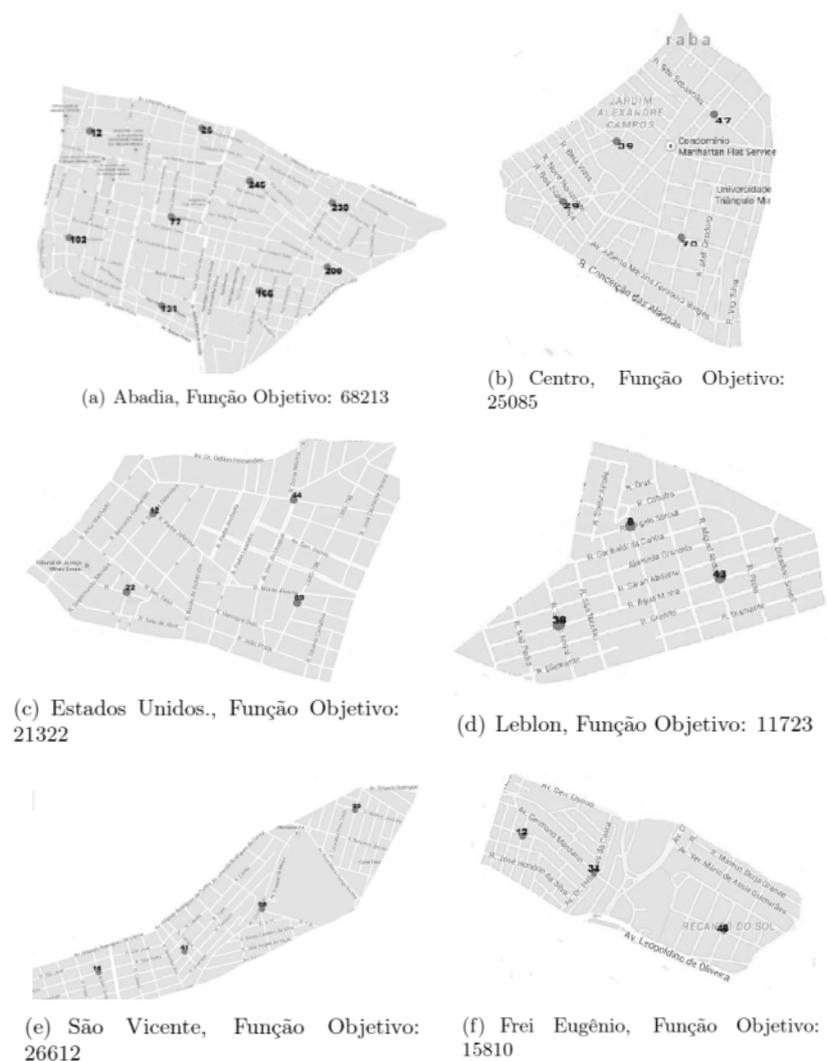


Figura 7 – Resultado do modelo para minimizar distância total percorrida.

Fonte: Adaptado do Google Maps.

Vale apontar que as soluções apresentam melhores valores para a função objetivo pois o modelo é menos restrito - os pontos de demanda não têm distância máxima para serem atendidos por um PEV.

2.3.4 Hipóteses Analisadas

A fim de verificar se é adequado localizar os contentores nas interseções das ruas, foram realizados alguns testes inserindo pontos intermediários entre as interseções. Um novo conjunto de dados foi implementado com base nos dados estudados anteriormente e novos pontos foram inseridos entre todos os pontos adjacentes. As seguintes hipóteses são analisadas:

- T1: Determinamos onde alocar os PEVs, considerando somente as interseções das ruas como pontos candidatos para instalação;
- T2: Determinamos onde alocar os PEVs, considerando as interseções das ruas e pontos intermediários criados entre as interseções, como pontos candidatos para instalação.

Para o modelo da Seção 2.2.1 que busca minimizar o número de PEVs instalados (para 500 metros no bairro Abadia), 78% dos pontos selecionados são interseções das ruas. No modelo da Seção 2.2.2 que busca minimizar a distância total percorrida, 100% dos pontos selecionados são interseções das ruas. Apoiado nesses resultados, consideramos aceitável utilizar somente os pontos das interseções das ruas como pontos de alocação. Segundo Barão *et al.* (2009), podemos considerar os vértices da rede como pontos de demanda e possíveis pontos de localização dos contentores, sendo que, toda a demanda de um vértice é atendida por um único centro. Todo ponto de demanda deve ser servido pelo centro mais próximo e não existem restrições de capacidade nos vértices.

Como o principal bairro analisado da cidade de Uberaba é o Abadia, foram aplicados os modelos individualmente no bairro e em seus bairros vizinhos: São Vicente, Centro, Estados Unidos, Leblon e Frei Eugênio. Além disso, quatro conjuntos de testes foram realizados para analisar a interferência dos bairros adjacentes no planejamento da localização:

- T3: Implementação dos modelos propostos individualmente para cada bairro analisado, buscando soluções ótimas locais;
- T4: Implementação dos modelos propostos de forma incremental, os quais, um bairro de cada vez era interligado nos demais bairros que já possuíam os pontos de coleta selecionados.
- T5: Implementação dos modelos propostos de forma conjunta para todos os bairros analisados;
- T6: Implementação dos modelos propostos de forma incremental, com a ordem de aplicação nos bairros invertida.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

O objetivo dessa análise é verificar se há diferença em determinar a localização de pontos individualmente em cada bairro ou com os bairros em conjunto, e definir como a tomada de decisão influencia em decisões futuras e se a distância de atendimento também interfere no método. Para verificar se a ordem de localização incremental influenciava no resultado, foram realizados testes com a ordem invertida, ou seja, a localização foi realizada com ordem de interligação dos bairros inversa ao primeiro teste incremental (T4).

Para melhor visualização, usamos nos resultados a notação apresentada na Seção de Hipóteses (2.2.4). Nas tabelas dos resultados, apresentamos o número de PEVs a ser instalados em cada bairro, o tempo de processamento (em segundos) do modelo (2.1) – (2.4) denotado por $P(s)$ e a média da somatória das distâncias atendidas por cada PEV como um indicador de proximidade entre os PEVs e os demais pontos atendidos. Os resultados para todos os testes com a restrição de distância máxima de 500 metros para o atendimento de um PEV são sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2: Testes para distância máxima de 500 metros.
Fonte: Própria autoria.

Bairros	T3		T4		T5		T6	
	Número de PEVs	$P(s)$						
Abadia	9	0,4	9	0,1	8	4,3	7	0,1
São Vicente	4	0,1	3	0,1	3		3	0,1
Centro	4	0,1	4	0,1	3		4	0,1
Estados Unidos	4	0,1	2	0,1	2		2	0,1
Leblon	3	0,1	3	0,1	2		3	0,1
Frei Eugênio	3	0,1	3	0,1	3		3	0,1
Média das distâncias dos pontos atendidos por cada PEV	253,0		260,5		267,5		268,8	

Através da Tabela 2 é possível verificar a diferença dos resultados para as diferentes abordagens testadas. Como é esperado, a abordagem de planejamento individual dos bairros (T3) apresenta o maior número de PEVs necessários para atender toda a região estudada, porém, possui a menor média da soma das distâncias dos pontos atendidos por cada PEV, estando em média mais próximo da população. Isso se deve a uma visão míope dessa abordagem que desconsidera que um usuário pode ser atendido por um PEV instalado no bairro vizinho.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Por outro lado, a estratégia que analisa todos os bairros de forma conjunta (T5) possui um planejamento mais abrangente e apresenta o menor número de PEVs necessários para atender toda a área analisada, mas com a maior média da soma das distâncias, 36% maior que a média de T3. O teste incremental T4 se comportou de forma intermediária entre T3 e T5, buscando um maior equilíbrio entre a quantidade de PEVs necessários e a distância média encontrada. De forma análoga, a abordagem incremental com ordem invertida (T6) também ficou entre os resultados T3 e T5, mas sua solução ficou mais próxima da abordagem que considera os bairros de forma conjunta.

De forma análoga, a Tabela 3 apresenta os resultados com restrição de distância máxima de 300 metros para o atendimento. Observa-se que uma diminuição de 40% da distância máxima utilizada no teste anterior (500 metros) causou um aumento médio de 240% no número de PEVs necessários para atender a restrição imposta.

Tabela 3: Testes para distância máxima de 300 metros.

Fonte: Própria autoria.

Bairros	T3		T4		T5		T6	
	Número de PEVs	P(s)	Número de PEVs	P(s)	Número de PEVs	P(s)	Número de PEVs	P(s)
Abadia	21	0,6	21	0,6	19	449,6	20	0,7
São Vicente	9	0,1	7	0,1	7		9	0,2
Centro	9	0,1	9	0,1	8		8	0,1
Estados Unidos	9	0,1	8	0,1	8		8	0,1
Leblon	5	0,1	4	0,1	4		4	0,1
Frei Eugênio	8	0,1	8	0,1	6		8	0,1
Média das distâncias dos pontos atendidos por cada PEV	155,2		155,4		165,9		157,5	

A Tabela 4 apresenta os resultados com restrição de distância máxima de 100 metros. Nesse caso, uma diminuição de 500% na distância máxima (em relação à distância de 500 metros), resultou em um aumento mínimo de 1100% na quantidade de PEVs necessários para atender essa configuração. O tempo de processamento em T5 chama a atenção devida sua rapidez de resolução, compreendido pelas distâncias entre os pontos de interseções, que em grande parte, superam o valor da distância máxima estipulada para o atendimento.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Tabela 4: Testes para distância máxima de 100 metros.

Fonte: Própria autoria.

Bairros	T3		T4		T5		T6	
	Número de PEVs	P(s)						
Abadia	104	0,1	104	0,1	97	0,1	99	0,1
São Vicente	42	0,1	40	0,1	39		40	0,1
Centro	51	0,1	50	0,1	46		49	0,1
Estados Unidos	48	0,1	48	0,1	45		47	0,1
Leblon	24	0,1	24	0,1	25		24	0,1
Frei Eugênio	29	0,1	29	0,1	27		28	0,1
Média das distâncias dos pontos atendidos por cada PEV	41,9		42,8		43,6		43,2	

2.3.5 Testes com Distâncias Homogêneas entre os Pontos

Para uma análise mais contundente, analisamos outras configurações de bairros, por exemplo, os mesmos bairros com distâncias homogêneas entre as interseções das ruas. Para esses testes, consideramos os bairros apresentados na Tabela 1, porém, com todas as distâncias entre as interseções de 100 metros. O intuito é verificar se em diferentes tipos de configurações do mesmo bairro haveria alterações significativas no resultado, mostrar a robustez do método e podendo assim, replicar ou não em outras cidades. As Tabelas 5, 6 e 7 exibem os mesmos testes aplicados nas tabelas anteriores, porém com o diferencial que as distâncias entre as interseções das ruas foram alteradas para simular uma homogeneização das medidas.

Tabela 5: Testes para distância máxima de 500 metros com distâncias homogêneas entre pontos.

Fonte: Própria autoria.

Bairros	T3		T4		T5		T6	
	Número de PEVs	P(s)						
Abadia	6	0,1	6	0,20	6	0,7	5	0,1
São Vicente	3	0,1	3	0,1	3		3	0,1
Centro	3	0,1	3	0,1	2		2	0,1
Estados Unidos	3	0,1	3	0,1	2		2	0,1
Leblon	3	0,1	2	0,1	1		2	0,1
Frei Eugênio	2	0,1	2	0,1	2		2	0,1
Média das distâncias dos pontos atendidos por cada PEV	260,5		274,9		297,7		306,0	

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Tabela 6: Testes para distância máxima de 300 metros com distâncias homogêneas entre pontos.
Fonte: Própria autoria.

Bairros	T3		T4		T5		T6	
	Número de PEVs	1,27	Número de PEVs	P(s)	Número de PEVs	P(s)	Número de PEVs	P(s)
Abadia	14	3,2	14	3,23	13	459,3	12	0,1
São Vicente	8	0,1	8	0,1	7		8	0,1
Centro	6	0,1	6	0,1	6		6	0,1
Estados Unidos	6	0,1	5	0,1	5		5	0,1
Leblon	4	0,1	3	0,1	3		3	0,1
Frei Eugênio	5	0,2	5	0,1	4		5	0,1
Média das distâncias dos pontos atendidos por cada PEV	187,6		190,0		194,5		194,5	

Tabela 7: Testes para distância máxima de 100 metros com distâncias homogêneas entre pontos.
Fonte: Própria autoria. * Memória insuficiente para a obtenção da solução.

Bairros	T3		T4		T5		T6	
	Número de PEVs	P(s)	Número de PEVs	P(s)	Número de PEVs	P(s)	Número de PEVs	P(s)
Abadia	65	446,9	65	446,9	*	*	65	0,1
São Vicente	28	0,1	28	0,2	*		25	0,1
Centro	25	0,2	25	0,6	*		22	0,1
Estados Unidos	22	0,2	22	0,1	*		15	0,1
Leblon	16	0,2	15	0,1	*		28	0,1
Frei Eugênio	18	0,1	17	0,1	*		17	0,1
Média das distâncias dos pontos atendidos por cada PEV	73,7		75,3		*		74,8	

Através desse conjunto de testes, foi possível verificar que a homogeneização das distâncias influencia na diminuição do número de contentores para atender as restrições dos modelos. Em alguns casos, tal configuração também aumentou o tempo de resolução, sendo que algumas soluções não foram alcançadas devido à falta de memória suficiente do equipamento utilizado. Podemos notar que quando não há diferença nas distâncias entre os pontos, a tomada de decisão se torna mais complexa.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

2.3.6 Testes para uma Área Planejada

Este novo conjunto de testes ocorre sobre bairros de uma cidade planejada, nas quais todos os quarteirões teriam um formato quadrado com dimensões equivalentes. Um novo conjunto de dados foi gerado para criação das regiões planejadas considerando o mesmo número de pontos nos bairros.

As Tabelas 8, 9 e 10 disponibilizam as soluções para os cenários de uma cidade planejada, na qual todo quarteirão assumiria uma forma quadrada e as distâncias entre as interseções seriam iguais.

Tabela 8: Testes para distância máxima de 500 Metros para uma área planejada.

Fonte: Própria autoria.

Bairros	T3		T4		T5		T6	
	Número de PEVs	P(s)						
Abadia	7	0,5	7	0,5	6	6,2	7	0,2
São Vicente	4	0,1	4	0,1	3		3	0,1
Centro	4	0,1	3	0,1	2		2	0,1
Estados Unidos	4	0,1	3	0,1	2		2	0,1
Leblon	3	0,1	3	0,1	2		2	0,1
Frei Eugênio	3	0,1	3	0,1	1		1	0,1
Média das distâncias dos pontos atendidos por cada PEV	278,1		274,8		313,8		305,3	

Tabela 9: Testes para distância máxima de 300 Metros para uma área planejada.

Fonte: Própria autoria. * Memória insuficiente para a obtenção do resultado.

Bairros	T3		T4		T5		T6	
	Número de PEVs	P(s)						
Abadia	15	1,0	15	1,00	*	*	15	0,2
São Vicente	7	0,1	7	0,29	*		6	0,1
Centro	7	0,1	7	0,03	*		5	0,1
Estados Unidos	6	0,1	6	0,02	*		4	0,1
Leblon	5	0,1	5	0,02	*		4	0,1
Frei Eugênio	5	0,1	4	0,02	*		3	0,1
Média das distâncias dos pontos atendidos por cada PEV	185,6		155,2		*		198,6	

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Tabela 10: Testes para distância máxima de 100 Metros para uma área planejada.

Fonte: Própria autoria. * Memória insuficiente para a obtenção do resultado.

Bairros	T3		T4		T5		T6	
	Número de PEVs	P(s)	Número de PEVs	P(s)	Número de PEVs	P(s)	Número de PEVs	P(s)
Abadia	62	7105,1	62	7105,1	*	*	61	0,2
São Vicente	28	2,3	27	0,3	*		27	0,1
Centro	26	0,5	25	0,3	*		25	0,1
Estados Unidos	23	0,1	22	0,2	*		22	0,1
Leblon	17	0,3	16	0,2	*		16	0,2
Frei Eugênio	13	0,1	13	0,1	*		13	0,4
Média das distâncias dos pontos atendidos por cada PEV	63,6		41,9		*		74,3	

Pode-se perceber que nesse caso, o número de contentores necessários para atender as restrições de distância é menor quando comparado ao problema original. Porém, também é evidente que para essa configuração de bairros, o tempo necessário de resolução pelo resolvidor é maior, assim como a memória utilizada do equipamento, que em alguns casos não foi suficiente para gerar a solução.

Através do tempo de resolução do resolvidor foi possível comprovar que, o incremento do número de pontos candidatos a serem localizados e alocados como PEVs, também aumenta o tempo de resolução do problema. Analisando individualmente os bairros, o maior tempo obtido de resolução foi para o bairro Abadia, sendo que a configuração do bairro também influenciou no tempo de solução devido ao caráter não planejado da cidade. Com as distâncias originais, o tempo de solução máximo foi de 14 segundos. Nos testes com as distâncias homogêneas (de uma cidade planejada, por exemplo), o tempo de solução máximo foi de 1,97 horas. Como esperado, ao considerar todos os bairros de forma conjunta, o tempo de solução aumentava, assim como a necessidade de memória, que em alguns casos não foi suficiente. Para a abordagem incremental, os tempos de resolução não ultrapassaram os tempos encontrados na análise individual de bairros.

3. Considerações

O presente trabalho apresenta um método de planejamento de localização de contentores para coleta de resíduos sólidos recicláveis. Através de diferentes análises de cenários e estudo de sua aplicação, o desenvolvimento deste estudo pode auxiliar a administração pública na

tomada de decisão sobre a implantação da coleta seletiva de material reciclável. Através de métodos da gestão de serviços públicos e localização de facilidades, foi possível apresentar três alternativas de modelos matemáticos que devem ser adaptados às necessidades do perímetro analisado, que pode minimizar o número de contentores utilizados ou oferecer da melhor forma possível um serviço para a população. Juntamente com o estudo dos possíveis locais para implantação dos PEVs, percebe-se que a implantação da política de PEVs pode ser facilmente aplicada em diversos cenários. Assim como apontado por González-Torre e Adenso-Díaz (2005), a cultura e os costumes são grandes barreiras devido à população não estar acostumada a realizar a separação do lixo, além da resistência em depositar o material em outro local que não seja próximo a residência.

Em relação aos resultados dos testes sobre o método, podemos perceber que quanto menor a distância máxima de percurso até um PEV, maior será o tempo de resolução e seus respectivos custos operacionais para a obtenção de soluções. Esses custos estão relacionados com a aquisição de equipamento computacional com capacidade suficiente de processamento. A homogeneização das distâncias entre as interseções também apresentou a necessidade de um equipamento computacional com maior capacidade de armazenamento, já que no presente estudo, o equipamento possui memória RAM insuficiente para a resolução.

Para a implantação do método de coleta por PEVs, sugerimos a utilização da abordagem incremental, em que, o planejamento de um bairro deve considerar os PEVs já instalados nos bairros vizinhos. Observou-se que em tal abordagem, as soluções obtidas no resolvidor apresentam qualidade intermediária entre as soluções para o planejamento individual dos bairros e com todos os bairros juntos. No caso em que a ordem do planejamento dos bairros foi invertida, foi possível obter soluções semelhantes ao planejamento de todos os bairros juntos. Outra vantagem da abordagem incremental é a análise que se pode fazer da aderência da população que, se for positiva, então podemos replicar o método no próximo bairro.

A partir do presente estudo é possível identificar novas oportunidades de pesquisa visando melhorar o método proposto de localização de PEVs para coleta de resíduos recicláveis. Dessa forma, esperamos facilitar sua aplicação em diferentes cenários. Dentre as possibilidades de futuros estudos, podemos citar estudos sobre:

- A influência da distância dos contentores em relação à aderência da população no modelo de coleta;

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

- A relação entre os custos de se alocar maior número de contentores e a receita advinda da participação dos moradores. Barão *et al.* (2009) demonstram uma análise em relação a quantidade de PEVs instalados e a distância média percorrida pelo morador. A distância média a ser percorrida por morador não é alterada de forma linear. O estudo citado pode contribuir para a análise de custo/benefício da localização dos contentores.
- Métodos alternativos de solução (heurística ou meta-heurísticas, por exemplo) para quando o número de interseções de ruas é alto.

Ressaltamos que a implantação de PEVs pode ser um ponto de partida para aumentar a participação da população na coleta seletiva. As pessoas anseiam pela reciclagem, porém não possuem meios ou uma estrutura viável para realizá-la. Entretanto, somente a implantação do sistema de coleta não é suficiente para garantir a aderência da população. Torna-se necessário realizar campanhas para conscientização da população e ações que reforcem a prática da coleta seletiva. Dessa forma, uma oportunidade de negócio é evidenciada, na qual o poder público pode também ser devidamente remunerado ao se encarregar do manejo correto de resíduos, possibilitando aumentar a verba municipal e a imagem socioambiental.

Agradecimentos

À FAPEMIG, pelo suporte financeiro. Aos revisores, pelas sugestões que contribuíram para a melhoria do artigo.

Referências

- Arakaki, R. G. I. (2003). Heurística de localização-alocação para problemas de localização de facilidades. 2003. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.
- Arenales, M.; Morabito, R.; Armentano, V.; Yanasse, H. (2006). Pesquisa operacional. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Barão, F. R.; Kripka, M.; Kripka, R. M. L. (2009). Determinação da localização ótima de postos de entrega voluntária para coleta seletiva na região central do município de Passo Fundo - RS. Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Porto Seguro, BA. p. 1121-1130.
- Barki, T. V. P. (2012). Guia de implantação de coleta seletiva em municípios. Brasília.
- Finkbeiner, M.; Schau, E. M.; Lehmann, A.; Traverso, M. (2010). Towards life cycle sustainability assessment. Sustainability, v. 2, n. 10, p. 3309-3322.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Fitzsimmons, J. A.; Fitzsimmons, M. J. (2010). Administração de Serviços: operações, estratégia e tecnologia da informação. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman.

González-Torre, P. L.; Adenso-Díaz, B. (2005). Influence of distance on the motivation and frequency household recycling. *Waste Management*, v. 25, n. 1, p. 15-23.

González-Torre, P. L.; Adenso-Díaz, B., Ruiz-Torres, A. (2003). Some comparative factors regarding recycling collection systems in regions of the USA and Europe. *Journal of Environmental Management*, v. 69, n. 2, p. 129-138.

IPEA- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2013). Diagnóstico dos resíduos sólidos. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2015.

Loureiro, S. A.; Barbosa, C. L.; Lima, O. F. (2012). Procedimento para localização e alocação de vagas de carga e descarga em centros urbanos. Anais do XXVI Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte, Joinville, SC. p. 1299-1310.

Macedo, A. R. (2013). Produção de lixo no Brasil aumentou em 60 mil toneladas desde 2007. Câmara dos deputados. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/noticias/MEIO-AMBIENTE>>. Acesso em: 25 mai. 2015.

Peixoto, K. (2006). Contribuição ao planejamento e operação da coleta seletiva em área urbana. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.

SEDEC - Secretaria Municipal de Desenvolvimento Econômico e Turismo. (2010). Uberaba em dados. Relatório técnico, Uberaba.

SNIS- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. (2012). Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos. Relatório técnico, Brasília.