



Exacta

ISSN: 1678-5428

ISSN: 1983-9308

geraldo.neto@uni9.pro.br

Universidade Nove de Julho

Brasil

Tormen, Andréia Fátima; Pansera, Gustavo; Kripka, Moacir
Otimização das rotas para veículos de manutenção do
sistema de iluminação pública na cidade de Passo Fundo (RS)
Exacta, vol. 16, núm. 3, 2018, Julio-Septiembre, pp. 89-101
Universidade Nove de Julho
São Paulo, Brasil

DOI: <https://doi.org/10.5585/ExactaEP.v16n3.7636>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81058961007>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Otimização das rotas para veículos de manutenção do sistema de iluminação pública na cidade de Passo Fundo (RS)

Routes optimization of vehicles for maintenance of the public illumination system in Passo Fundo (RS)

Andréia Fátima Tormen¹

Gustavo Pansera²

Moacir Kripka³

Resumo

O gasto com o transporte para manutenção do sistema de iluminação pública representa custos elevados nos orçamentos municipais. A não racionalização das rotas podem acarretar maiores custos de manutenção e gerenciamento destes sistemas. Neste estudo foi realizada a otimização da roteirização dos veículos utilizados nos serviços de manutenção do sistema de iluminação pública da cidade de Passo Fundo (RS), aplicando-se o método do Problema do Caixeiro Viajante (PCV), a fim de se determinar os roteiros ótimos e ilustrar a importância dos métodos de otimização para resolução de problemas reais. Fez-se a otimização das rotas por meio do programa computacional LINGO e obteve-se que as soluções ótimas apresentaram redução de 14,6 % nos percursos, o que resultaria na diminuição dos gastos com combustível, minimização do tempo percorrido e maior eficiência no atendimento, evidenciando a grande aplicabilidade e eficácia dos métodos de otimização na resolução de problemas reais e cotidianos.

Palavras-chave: Métodos de otimização. Roteirização de veículos. Diminuição dos gastos. Problema do Caixeiro Viajante.

Abstract

The cost of transportation for maintenance of the public lighting system represents high costs in the municipal budgets. The non-rationalization of the routes can lead to higher costs of maintenance and management of these systems. In this study the optimization of the routes traveled by the vehicles used in the maintenance services of the public lighting system of the city of Passo Fundo (RS) was carried out, applying the Voyager Salesman Problem (PCV) method, in order to determine the And illustrate the importance of optimization methods to solve real problems. The optimization of the routes was done by means of the LINGO computational program and it was obtained that the optimal solutions showed a reduction of 14.6% in the routes, which would result in the reduction of the expenses with fuel, minimization of the time covered and greater efficiency in the service, Evidencing the great applicability and effectiveness of optimization methods in solving real and daily problems.

Keywords: Optimization methods. Routing of vehicles. Reduction of expenses. Problem of the Traveling Salesman.

¹ Universidade de Passo Fundo
andreiatormen@gmail.com

² Universidade de Passo Fundo
gustavo@iluminaenergia.com.br

³ Universidade de Passo Fundo
mkripka@upf.br



1 Introdução

A Pesquisa Operacional (PO) é uma ciência que objetiva fornecer ferramentas quantitativas ao processo de tomada de decisões (Assad, 1988). O Problema do Roteamento de Veículos (PRV) é um dos problemas mais estudados da PO, sendo um dos precursores do seu sucesso nas últimas décadas, tendo sido abordado em vários trabalhos com formas de resolução diferentes.

Cunha (2000) designa roteirização ou roteamento de veículos como o processo de determinação de roteiros, ou sequência de paradas a serem cumpridas por uma frota de veículos. Os modelos de roteirização têm como principal função a definição da melhor rota para coleta, ou entrega, para atendimento de solicitações de serviços, bem como, a definição dos pontos geograficamente mais estratégicos de parada ou passagem por parte de um dado veículo, em um roteiro pré-definido. Desta forma, podem servir de subsídio à determinação do número de veículos envolvidos e suas capacidades de atendimento às demandas de serviço num determinado processo de roteirização, de forma a minimizar os custos associados ao sistema de transporte e o tempo de atendimento aos clientes (Ballou, 1993).

Cunha (2000) também destaca que problemas de roteirização de veículos são definidos muitas vezes, como problemas de um ou mais caixeiros viajantes, tais que incluem restrições adicionais de capacidade, além de outras que dependem de cada aplicação. O Problema do Caixeiro Viajante (PCV), pode ser definido como o problema no qual se objetiva encontrar uma rota ou roteiro que passa por um conjunto de n cidades, percorrendo cada uma destas uma única vez e retornando à cidade de origem, de tal forma que a distância total (ou custo de viagem) percorrida seja mínima (Silva, & Oliveira, 2006).

O interesse pelo PCV surge devido a sua grande aplicabilidade prática na engenharia e nas ciências e relação com outros modelos. Em suas diversas aplicações em casos de problemas reais que podem ser modelados como um PCV, tem-se por exemplo: roteamento de veículos; programação e distribuição de tarefas em plantas; programação de transporte entre células de manufatura; programação de operações em máquinas de manufatura; perfuração de furos em placas de circuitos integrados/impressos; mapeamento e sequenciamento do DNA humano; otimização do movimento de ferramentas de corte; proposta para a coleta de lixo seletiva; dentre outras aplicações. Além disso, o mesmo tem sido usado como “*benchmark*” para avaliação de novos algoritmos e estratégias de solução que envolvem busca tabu, algoritmos genéticos, “*simulated annealing*”, redes neurais, entre outros (Barão, Kripka, & Kripka, 2009; Souza, 1993; Silva, & Sanches, 2009; Cunha, Bonasser, & Abrahão, 2002; Guedes, Leite, & Aloise, 2005).

Neste sentido, as técnicas de otimização auxiliam no processo de tomada de decisões em qualquer âmbito, uma vez que estas possibilitam realizar a previsão e/ou minimização dos custos e gastos desnecessários, sejam estes de tempo, recursos físicos e/ou financeiros, bem como a maximização dos lucros, desempenho e produtividade, o que também fora concluído por Selong e Kripka, em seu trabalho desenvolvido em 2009, após determinarem quais seriam os roteiros de menor distância para que uma empresa localizada em Passo Fundo pudesse realizar a distribuição de ferro para cidades da região, de maneira mais rápida e mais econômica.

Como exposto por Selong e Kripka (2009) e Medeiros e Kripka (2012) a importância de se utilizar ferramentas computacionais em tais aplicações se dá devido aos problemas reais geralmente apresentarem um grande número de variáveis envolvidas e ao próprio comportamento

diferenciado das funções. Tais condições tornam a resolução muito complexa e praticamente humanamente impossível.

Segundo Reinelt (1994) e Melamed, Sergeev e Sigal (1990), o PCV é um exemplo clássico de um problema de otimização combinatória. O termo otimização combinatória é um ramo da matemática e da ciência da computação que analisa problemas de otimização em conjuntos, cujo objetivo central é encontrar um subconjunto cujo custo seja mínimo. Basicamente, a resolução de um problema de otimização combinatória consiste simplesmente em combinar ou enumerar todas as possíveis soluções. Ou seja, criar todos os subconjuntos existentes a partir do conjunto e das restrições existentes, de forma a escolher o de menor custo (Cordenonsi, Müller, Bastos, Araújo, & Elenusa, 2007).

No Brasil, existem em torno de 14,7 milhões de pontos de iluminação pública instalados, e o consumo de energia anual de tais pontos somados, segundo a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2016), representa 3,3% do total de energia consumida no Brasil em 2015, sendo assim, o setor de iluminação pública se configura como um setor de grande representatividade no consumo de energia no Brasil. Neste sentido, ações que resultem em uma economia neste setor são indispensáveis e de interesse de todos (PROCEL, 2017).

Segundo a Constituição brasileira (BRASIL, 1988) e a Resolução da Aneel nº. 414 (ANEEL, 2010), todos os serviços referentes a iluminação pública no Brasil são de responsabilidade dos governos municipais. Os municípios devem pagar os custos da prestação de serviços de instalação, operação e manutenção dos sistemas de iluminação pública. Também, devem avaliar todos os custos adquiridos com os sistemas ao longo dos anos, não apenas o custo da compra dos mesmos, pois, durante a vida útil de uma instalação de iluminação pública, os custos com a manutenção

chegam a 50% do total dos custos durante a vida útil (Santos, 2011).

Segundo Schulz (2010), as atividades de manutenção e o seu adequado planejamento são importantes para assegurar a qualidade do sistema de iluminação pública, com o mínimo custo e a máxima utilização dos equipamentos. Portanto, todas práticas que apresentem economia de recursos durante a manutenção são importantes, inclusive, a economia de combustível durante as manutenções, podem representar grandes economias de recursos e diminuir o custo durante a vida útil dos sistemas de iluminação pública.

Conforme Santos (2011), manutenções regulares e sistemáticas nos sistemas de iluminação pública são fundamentais para a qualidade da iluminação e permitem evitar desperdícios de energia elétrica, uma vez que todo sistema de iluminação está sujeito a desgastes contínuos devido a sua exposição às intempéries do ambiente externo, fai-lhas na rede de distribuição de energia elétrica, bem como, a fatores atribuídos ao próprio homem, como a depredação, ou mesmo de natureza aleatória, como o abaloamento nos postes e os galhos de árvores que podem vir a danificar danificando as luminárias e interferir na qualidade do serviço (Schulz, 2010).

Na cidade de Passo Fundo, a responsabilidade pela manutenção do sistema de iluminação pública é da própria Prefeitura, sendo este serviço realizado pela Secretaria de Transportes e Serviços Gerais (STSG). Em função do grande número de solicitações para os serviços de manutenção das luminárias, somado a limitação dos recursos financeiros, de efetivo e de veículos disponíveis, bem como, à falta de uma ferramenta ou sistema computacional eficiente, a demanda muitas vezes não é atendida com eficiência e os gastos com combustível para transporte dos funcionários se torna mais elevado que o necessário.

A partir desta problemática, este trabalho objetiva encontrar uma solução para otimização das rotas percorridas pelos veículos utilizados na prestação do serviço de manutenção do sistema de iluminação pública da cidade de Passo Fundo (RS), aplicando-se o método do Problema do Caixeiro Viajante (PCV).

2 Problema do caixeiro viajante

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) pode ser definido como um problema, no qual se pretende estabelecer uma única rota que passe em cada nó de um grafo, apenas uma única vez, retornando ao nó inicial ao fim do percurso (Benevides, 2011). Sua origem é devida a William Rowan Hamilton que, em 1857, propôs um jogo que denominou *Around the World*. O jogo foi elaborado com o objetivo de traçar um roteiro através dos vértices de um dodecaedro, sendo estes equivalentes as cidades, de forma que o percurso iniciasse e terminasse no mesmo vértice (cidade), sem nunca repetir a passagem (Cunha, Bonasser, & Abrahão, 2002).

Para Silva e Sanches (2009), o objetivo do PCV é encontrar, em um grafo $G = (V, A)$, o circuito hamiltoniano de menor custo. Sendo um grafo compreendido como um conjunto de vértices/nós (pontos que podem representar cidades, depósitos, postos de trabalho ou atendimento) e arestas (linhas que conectam os vértices, podendo representar ruas ou estradas, por exemplo) e um circuito Hamiltoniano, um passeio que percorre todos os vértices de um grafo e retorna ao vértice de origem (início do passeio), passando por cada vértice apenas uma vez. Este circuito Hamiltoniano deve ser feito de modo que a distância total percorrida seja mínima. A Figura 1 mostra com setas de cor vermelha um exemplo de circuito Hamiltoniano.

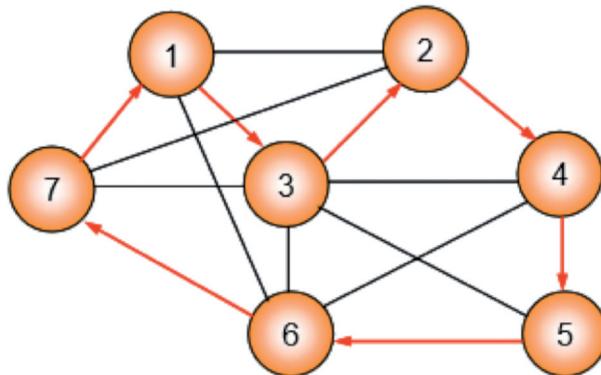


Figura 1: Exemplo do PCV

Fonte: Benevides, 2011.

Segundo Garey e Johnson (1979), Guedes, Leite e Aloise (2005) e Benevides (2011), o PCV pertence à classe de problema conhecido por NP-Hard ou NP-Difícil, isto é, possui ordem de resolução de complexidade não polinomial. Desta forma, os métodos reducionistas ou exatos se tornam práticos para o caso de N ser bem pequeno, ou seja, para os problemas de pequeno porte estes podem ser solucionados de forma ótima, caso contrário não, em virtude do esforço computacional que seria exigido para resolvê-los. Segundo Bodin, Golden, Assad e Ball (1983) e Helsgaun (2000), estes métodos são baseados em procedimentos de enumeração implícita em árvore, conhecidos como *branch-and-bound* (B&B), para os quais têm sido propostas diferentes funções limitadoras, o que acaba tendo uma aplicação limitada em função da complexidade combinatória destes problemas. Ainda não foi encontrado um método prático para resolver o PCV que envolva esforço polinomial, sendo um dos grandes problemas em aberto da Matemática (Selong & Kripka, 2009).

Ainda, Selong e Kripka (2009), em decorrência da limitação dos métodos exatos, métodos heurísticos compõem o principal foco de interesse para a resolução do PCV, em função destes fornecerem soluções factíveis muito próximas da ótima para resolução desses problemas

NP-Difícil. Para Cunha (2000) e Cordenonsi *et al.* (2007), heurística é um procedimento algoritmo de solução desenvolvido por meio de um modelo cognitivo, o qual se apoia em uma abordagem intuitiva ou experiência dos desenvolvedores. Os métodos heurísticos englobam estratégias, procedimentos e métodos aproximativos visando encontrar uma boa solução, mesmo que está não seja a ótima, em um tempo computacional razoável. Estes algoritmos vêm apresentando soluções parciais e ótimas para o problema, visto que, devido ao grande número de grandezas que influenciam o processamento computacional, tais como a capacidade de carga, a velocidade, o número de veículos, o tempo e a distância, esses precisariam de uma grande capacidade computacional para apresentar soluções exatas (Benevides, 2011).

Ainda segundo Benevides (2011), o PCV possui muitas variações sendo que algumas possuem algoritmos de aproximação que fornecem resultados próximos do ótimo. Essas variações do PCV podem ser classificadas em relação a:

- Simetria: É dito simétrico se a distância entre dois nós (ou cidades) quaisquer i e j independente do sentido for igual, isto é, $dij = dji$. Do contrário, é dito assimétrico. Os problemas simétricos são, em geral, mais difíceis de serem resolvidos que problemas assimétricos (Helsgaun, 2000).
- Completude: É dito completo se existe um caminho direto entre todos os pontos, do contrário é dito não completo.

Selong e Kripka (2009) e Goldbarg e Luna (2005) comentam que existem várias formulações para o PCV, devido sua importância e seu entendimento simplificado será mostrada a formulação de Dantzig-Fulkerson-Johnson (DFJ). De acordo com Christofides (1979) e Colin (2007), Dantzig,

Fulkerson e Johnson, formularam o PCV como um problema de programação 0-1 sobre um grafo $G = (N, A)$, com N nós e A arestas, como segue:

Minimizar

$$z = j = \sum_{i \in N} x_{ij} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1, \forall j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij} \leq S - 1, \forall S \in N \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in N \quad (5)$$

Em que:

N : número de nós da rede;

$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \forall j \in N$: significa que todo fluxo que chega no nó j deve ser igual a 1;

$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1, \forall i \in N$: significa que todo fluxo que sai do nó i deve ser igual a 1;

S : é subgrafo de G ;

S : é o número de vértices do subgrafo S ;

$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij} \leq S - 1, \forall S \in N$: significa que devem ser evitados subciclos;

$x_{ij}=0$ ou $x_{ij}=1$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$).

A variável assume o valor 1 se o arco for escolhido para integrar a solução e 0, caso contrário. Nesta formulação é nulo, pois não faria sentido sair do nó i e retornar para ele mesmo. Ainda, existem variáveis inteiras e binárias 0-1 e o problema possui o número de restrições da ordem .



3 Problema da manutenção das luminárias públicas

3.1 Caracterização do problema

Durante a vida útil de um sistema de iluminação, o mesmo acumula gastos, com os custos de operação e manutenção, que somados ao custo de aquisição formam o custo do ciclo de vida do sistema. A manutenção do sistema de iluminação representa uma parcela importante no custo do sistema, sendo um dos custos com a manutenção, o custo com combustível dos veículos utilizados para realizar a mesma. Muito tempo é desperdiçado pelas equipes rodando pela cidade para identificação dos pontos com defeitos e falhas no sistema, devido à falta de uma roteirização otimizada do trajeto para realizar as mesmas.

É necessário reduzir o tempo dedicado com as manutenções, sendo uma maneira de fazer isto, otimizando o roteiro das mesmas. Desta forma, as equipes poderiam realizar as manutenções com maior rapidez, priorizando os pontos com maior volume de falhas e que representem maior impacto e necessidade por parte da população em função do local e das proximidades dos pontos a serem atendidos ao logo de dia e turno na roteirização. Com isso, poderia-se realizar mais manutenções durante o dia, atendendo a uma maior demanda. Com isso, os custos com manutenções, bem como o custo do ciclo de vida de todo o sistema de iluminação podem ser reduzidos.

A manutenção das luminárias para iluminação pública na cidade de Passo Fundo é realizada pela Secretaria de Transportes e Serviços Gerais (STSG) da Prefeitura da cidade. Esta conta com três equipes de manutenção e é realizada nos turnos da manhã e tarde. A demanda pelos serviços de manutenção surge após a informação do defeito ou inficiência da luminária, fornecida por meio de ligações telefônicas realizadas pela população para a STSG. Na prática, cabe a um funcionário

da Secretaria programar os roteiros para atendimento dessas solicitações de serviço, contando com os veículos disponíveis. Atualmente não é utilizada nenhuma ferramenta ou tecnologia para se melhorar ou otimizar a rota destes veículos públicos que fornecem subsídios para realização dos serviços de manutenção da cidade.

Em função dos caminhões que auxiliam nos serviços de manutenção percorrerem muitas rotas diferentes, surgiu a necessidade de saber qual seria o melhor roteiro a ser percorrido pelos mesmos, a fim de se obter o percurso de distância mínima, de modo que o gasto com o transporte também seja mínimo. Com isso, este trabalho objetiva a optimização do roteamento dos veículos públicos utilizados para a manutenção do sistema de iluminação pública da cidade de Passo Fundo (RS).

Os municípios não conseguem atender a toda demanda, devido a limitação de recursos financeiros e de veículos e efetivo disponíveis, bem como, devido à falta de um sistema computacional eficiente para a construção desses roteiros (Baba, Corrêa, Souza, Wahba & Medina, 2004). Desta forma, em função do número de veículos ser finito, o objetivo do problema é construir uma programação de roteiro de modo a maximizar o número de solicitações atendidas e minimizar o custo no atendimento das mesmas. Uma vez que o custo fixo de um novo veículo é sempre muito superior ao custo de deslocamento desse veículo, para as soluções que atendam o mesmo número de solicitações e utilizem o mesmo número de veículos, será considerada melhor aquela em que a distância total percorrida pelos veículos for menor.

3.2 Levantamento de dados

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos diretamente com a STSG de Passo Fundo, a qual forneceu as rotas percorridas por um caminhão que realizou a manutenção das luminárias de iluminação pública (IP) no dia 08/05/2017.

Esses dados foram extraídos do software que permite monitorar, por meio de um rastreador instalado no veículo, todo percurso realizado pelo mesmo. Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os horários e pontos de partida e chegada do veículo, a quilometragem percorrida de um ponto a outro (em m), bem como as coordenadas geográficas dos pontos, nos turnos da manhã e tarde, respectivamente. O veículo em questão percorreu 6 pontos saindo do pátio da prefeitura e retornando ao mesmo, isto no turno da manhã (Tabela 1). Da mesma forma, saindo do pátio e retornando a este ponto no final do dia (pela tarde), passou por 9 pontos (Tabela 2). Neste dia, foram percorridos 20,5 km e 10,8 km, nos turnos da manhã e da tarde, respectivamente.

Para obtenção das distâncias mínimas entre os pontos foi utilizado o recurso Google

Maps (2017), disponível gratuitamente no site do Google. Primeiramente foram elaboradas duas matrizes contendo as distâncias entre os pontos percorridos pela manhã e entre os pontos percorridos pela tarde, apresentadas nas Tabelas 3 e 4, respectivamente, sendo que o caminhão inicialmente sai do pátio e, no final da rota, retorna ao pátio novamente. Além disso, cada ponto pode ser considerado um ponto de partida ou um ponto de chegada, ou seja, de todos os pontos pode-se chegar a todos os pontos, através do caminho mínimo indicado. As duas matrizes são assimétricas, visto que o percurso e a distância partindo de um ponto a outro ponto podem ser diferentes se feito o percurso inverso, pois nem todas as ruas da cidade são de mão dupla.

Os pontos na matriz estão representados pelos números de 1 a 15, mais pátio, que correspon-

Tabela 1: Dados retirados do rastreador do veículo – turno da manhã

Horário Partida	Horário Chegada	Ponto Partida	Ponto Chegada	Metros (m)	Coordenada Partida	Coordenada Chegada
08:35:38	08:41:23	Pátio	Ponto 1	1889	-28.250236666667,-52.39565166666667	-28.260863333334,-52.38814000000001
08:49:30	09:09:48	Ponto 1	Ponto 2	4655	-28.2608633333334,-52.38814000000001	-28.27775,-52.38681
09:29:25	09:34:50	Ponto 2	Ponto 3	2658	-28.27775,-52.38681	-28.287003333334,-52.372145
09:40:33	09:43:55	Ponto 3	Ponto 4	899	-28.2870033333334,-52.372145	-28.286188333333,-52.36556333333333
10:13:59	10:17:42	Ponto 4	Ponto 5	451	-28.286188333333,-52.36556333333333	-28.287278333333,-52.362406666666
10:23:27	10:43:22	Ponto 5	Ponto 6	2572	-28.287278333333,-52.362406666666	-28.289546666667,-52.35326333333334
10:47:25	11:06:06	Ponto 6	Pátio	7417	-28.289546666667,-52.35326333333334	-28.250236666667,-52.39565166666667

Fonte: Dos autores, 2017.

Tabela 2: Dados retirados do rastreador do veículo – turno da tarde

Horário Partida	Horário Chegada	Ponto Partida	Ponto Chegada	Metros (m)	Coordenada Partida	Coordenada Chegada
14:10:44	14:19:30	Pátio	Ponto 7	1664	-28.250236666667,-52.39565166666667	-28.252148333333,-52.38576
14:25:55	14:36:22	Ponto 7	Ponto 8	2461	-28.252148333333,-52.38576	-28.24547,-52.38299
14:40:25	14:51:55	Ponto 8	Ponto 9	978	-28.24547,-52.38299	-28.238978333333,-52.3762966666667
14:56:18	15:01:02	Ponto 9	Ponto 10	433	-28.238978333333,-52.3762966666667	-28.2378816666667,-52.3794383333334
15:18:54	15:22:57	Ponto 10	Ponto 11	1161	-28.2378816666667,-52.3794383333334	-28.24255,-52.3831266666668
15:30:23	15:32:24	Ponto 11	Ponto 12	313	-28.24255,-52.3831266666668	-28.239698333333,-52.38502
15:42:12	15:43:33	Ponto 12	Ponto 13	284	-28.239698333333,-52.38502	-28.237645,-52.38638
15:49:38	15:55:41	Ponto 13	Ponto 14	231	-28.237645,-52.38638	-28.238076666666,-52.3876083333334
16:07:30	16:19:39	Ponto 14	Ponto 15	1760	-28.238076666666,-52.3876083333334	-28.246068333333,-52.3884
16:25:02	16:44:05	Ponto 15	Pátio	1571	-28.246068333333,-52.3884	-28.250236666667,-52.39565166666667

Fonte: Dos autores, 2017.

de ao local de saída e retorno, sendo os pontos de 1 a 6 os correspondentes ao turno da manhã e os de 7 a 15 os percorridos no turno da tarde, a exemplo do percurso realizado no dia 08/05/2017. As distâncias constantes na matriz foram obtidas através do Google Maps, como mencionado, sendo obtidos a distância mínima, o tempo gasto e ainda, ao lado, o mapa com a imagem do deslocamento correspondente.

Tabela 3: Distâncias percorridas (em m) – turno da manhã

	Pátio	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Pátio	0	2200	4100	5600	5900	6300	7500
Ponto 1	2000	0	2500	4100	4400	4800	6000
Ponto 2	4500	2400	0	2200	2800	3300	4400
Ponto 3	6000	4000	2300	0	1100	1600	2700
Ponto 4	6300	4200	2600	1400	0	400	2000
Ponto 5	7100	4700	4700	2000	400	0	1700
Ponto 6	8100	5800	4100	3100	1700	1600	0

Fonte: Dos autores, 2017.

Tabela 4: Distâncias percorridas (em m) – turno da tarde

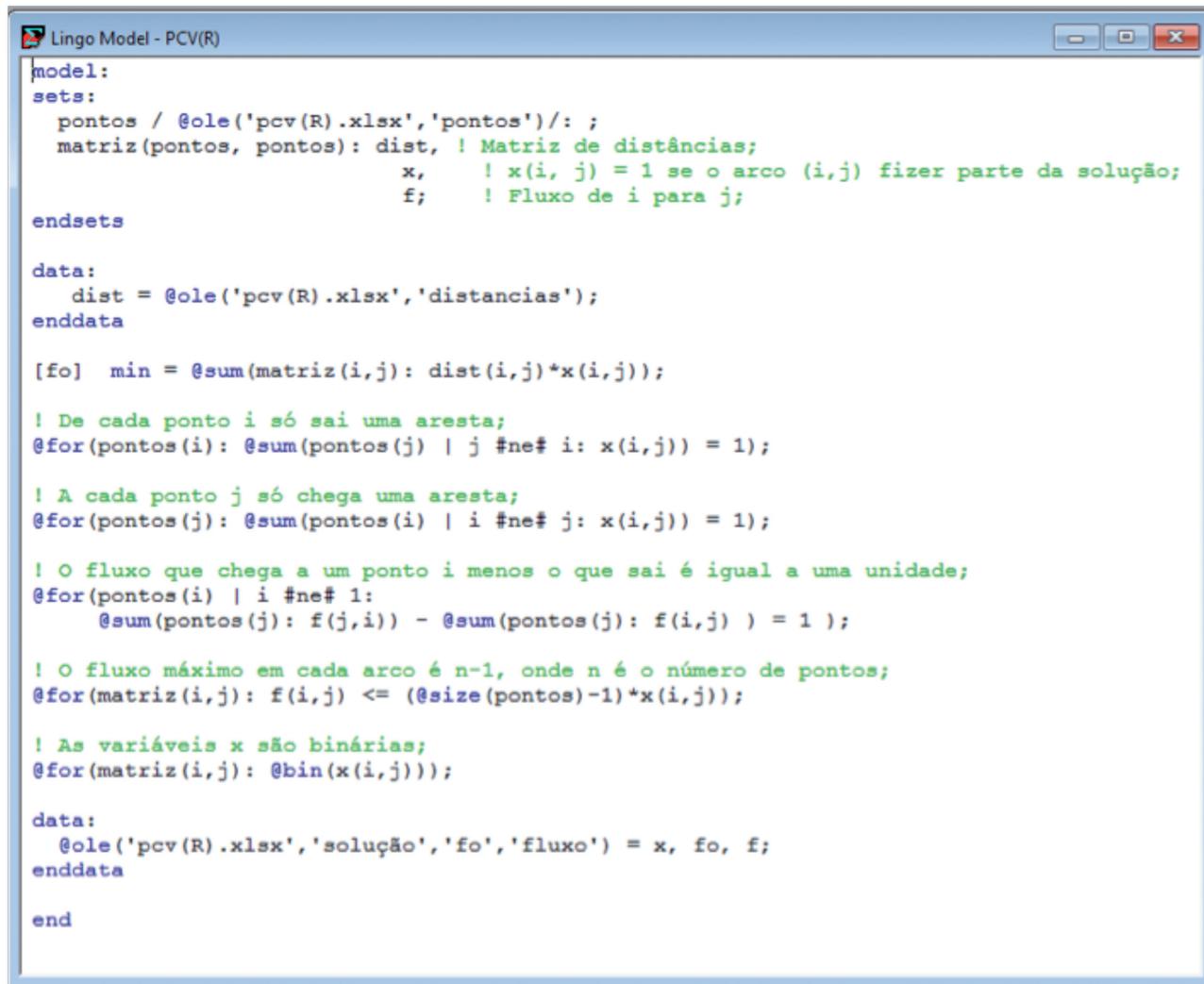
	Pátio	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Ponto 15
Pátio	0	2900	2800	3700	4500	3100	3400	3700	3600	2400
Ponto 7	2100	0	1000	2200	3000	1600	1900	2100	2100	900
Ponto 8	2300	1000	0	1100	1800	500	850	1100	1100	750
Ponto 9	3400	2100	1100	0	1800	1100	1300	1700	1800	1900
Ponto 10	3200	2300	1400	550	0	950	1100	100	1600	1600
Ponto 11	2400	1500	450	900	1700	0	400	750	800	700
Ponto 12	2800	1900	900	1100	400	400	0	350	450	1000
Ponto 13	3000	2100	1100	1400	1900	700	350	0	160	1300
Ponto 14	3000	2100	1100	1600	1900	800	450	160	0	1200
Ponto 15	1800	900	750	1500	2400	700	1000	1300	1200	0

Fonte: Dos autores, 2017.

3.3 Aplicação do software LINGO para optimização da melhor rota

A ferramenta comercial de modelagem e optimização LINGO versão 16.0 foi utilizada para a implementação e resolução computacional do modelo. O LINGO possui uma linguagem de modelagem própria e permite a formulação de modelos lineares e não lineares, a posterior resolução e análise das soluções obtidas. Essa linguagem permite expressar o problema de uma maneira muito similar à representação matemática padrão.

Após a definição das matrizes de distância entre os pontos percorridos tanto no turno da manhã como no da tarde, as mesmas foram adicionadas em uma planilha do EXCEL. Utilizou-se no LINGO a função @OLE, que é uma função de interface usada para mover dados entre o LINGO e o EXCEL, através de transferências baseadas em Object Linking and Embedding (OLE) (Souza *et al.*, 2012). Uma vez importadas as matrizes do EXCEL para o LINGO, definiram-se as restrições do problema, baseando-se no método do PCV. Subentende-se que existe apenas um caminho a ser percorrido, ou seja, deve-se estabelecer uma única rota que passe em cada ponto, apenas uma única vez, retornando ao ponto inicial ao fim do percurso. Estabelecidas essas restrições, exportou-se do LINGO os resultados ótimos para o EXCEL novamente. O modelo de programação utilizado é apresentado na Figura 2.



```

Lingo Model - PCV(R)

model:
sets:
  pontos / @ole('pcv(R).xlsx','Pontos')/: ;
  matriz(pontos, pontos): dist, ! Matriz de distâncias;
    x,      ! x(i, j) = 1 se o arco (i,j) fizer parte da solução;
    f;      ! Fluxo de i para j;
endsets

data:
  dist = @ole('pcv(R).xlsx','distancias');
enddata

[fo] min = @sum(matriz(i,j): dist(i,j)*x(i,j));

! De cada ponto i só sai uma aresta;
@for(pontos(i): @sum(pontos(j) | j #ne# i: x(i,j)) = 1;

! A cada ponto j só chega uma aresta;
@for(pontos(j): @sum(pontos(i) | i #ne# j: x(i,j)) = 1;

! O fluxo que chega a um ponto i menos o que sai é igual a uma unidade;
@for(pontos(i) | i #ne# 1:
  @sum(pontos(j): f(j,i)) - @sum(pontos(j): f(i,j)) = 1 );

! O fluxo máximo em cada arco é n-1, onde n é o número de pontos;
@for(matriz(i,j): f(i,j) <= (@size(pontos)-1)*x(i,j));

! As variáveis x são binárias;
@for(matriz(i,j): @bin(x(i,j)));

data:
  @ole('pcv(R).xlsx','solução','fo','fluxo') = x, fo, f;
enddata

end

```

Figura 2: Programação utilizada no LINGOFonte: Adaptado de Souza *et al.*, 2012.

4 Resultados e discussão

Primeiramente, obteve-se a rota otimizada para o turno da manhã, com auxílio da ferramenta LINGO, chegando-se à seguinte solução: Pátio – Ponto 1 – Ponto 4 – Ponto 5 – Ponto 6 – Ponto 3 – Ponto 2 – Pátio, sendo estes os pontos os quais deveriam ser seguidos em ordem, como uma possível rota ótima. A matriz de solução da roteirização do turno da manhã é apresentada na Tabela 5, bem como sua rota otimizada (Figura 3).

A rota obtida por meio do LINGO é diferente da percorrida pelo caminhão que fez a manuten-

Tabela 5: Matriz solução roteirização – turno da manhã

	Pátio	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Pátio	0	0	1	0	0	0	0
Ponto 1	1	0	0	0	0	0	0
Ponto 2	0	0	0	1	0	0	0
Ponto 3	0	0	0	0	0	0	1
Ponto 4	0	1	0	0	0	0	0
Ponto 5	0	0	0	0	1	0	0
Ponto 6	0	0	0	0	0	1	0

Fonte: Dos autores, 2017.

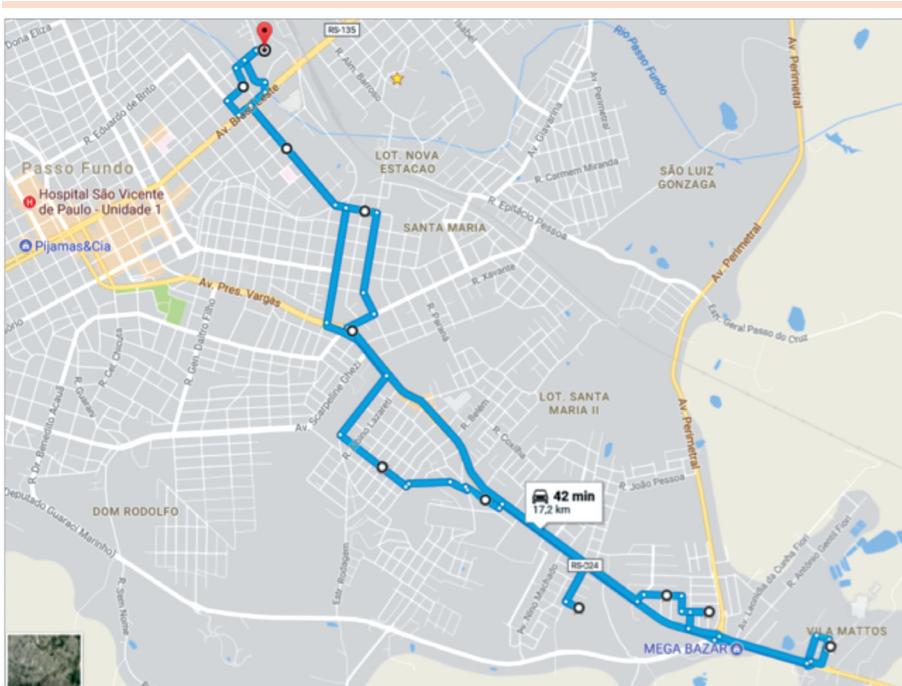


Figura 3: Rota otimizada do turno da manhã

Fonte: Google Maps, 2017.

ção das luminárias. A rota percorrida sem nenhum critério técnico ou de otimização pré-estabelecido, resultava em uma distância de 20,5 km, enquanto que a rota otimizada fornecida pelo LINGO, resultou em uma distância de 17,2 km. Pelo resultado obtido fica evidenciado que o percurso otimizado é vantajoso para o motorista percorrer. Neste caso houve uma redução de aproximadamente 16,09% na distância percorrida, ou 3,3 km.

A segunda rota analisada foi correspondente aos pontos percorridos no turno da tarde. Da mesma forma, chegou-se ao resultado de que a rota deveria passar pelos seguintes pontos: Pátio – Ponto 7 –

Ponto 8 – Ponto 9 – Ponto 10 – Ponto 12 – Ponto 13 – Ponto 14 – Ponto 11 – Ponto 15 – Pátio. A matriz da solução da roteirização pela parte da tarde é apresentada na Tabela 6 e a sua rota otimizada é ilustrada na Figura 4.

Novamente a rota obtida por meio do LINGO é diferente da percorrida pelo caminhão no dia analisado. O percurso realizado pelo mesmo resultava em uma distância de 10,8 km enquanto que, após a otimização do roteiro, obteve-se a redução da distância de

percurso para 9,5 km. Da mesma forma, para a rota otimizada para o turno da manhã, se comparadas as distâncias, infere-se que a solução gerada

Tabela 6: Matriz solução roteirização - turno da tarde

	Pátio	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Ponto 10	Ponto 11	Ponto 12	Ponto 13	Ponto 14	Ponto 15
Pátio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Ponto 7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ponto 8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Ponto 9	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Ponto 10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Ponto 11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Ponto 12	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Ponto 13	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Ponto 14	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Ponto 15	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Fonte: Dos autores, 2017.

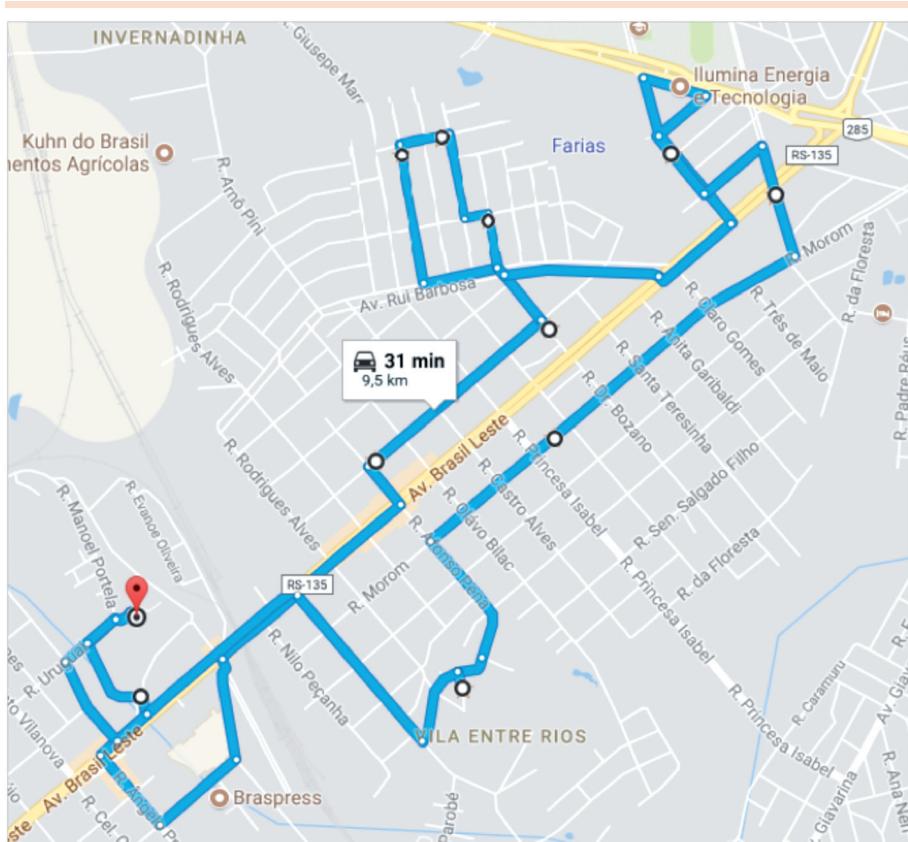


Figura 4:- Rota otimizada do turno da tarde

Fonte: Google Maps, 2017.

pelo LINGO continua sendo a mais viável economicamente, uma vez que indicou uma redução de aproximadamente 12,03%.

Se for considerado o preço do litro de diesel R\$ 3,00 e o consumo do caminhão de 1,8 km/L, contando que no turno da manhã e tarde a rota otimizada gerou uma redução de 4,6 km rodados, obtém-se uma redução de gastos com combustível de R\$ 7,67/dia. Em um mês, contando 5 dias úteis, essa economia seria de aproximadamente R\$ 154,00. Uma vez que tem-se 3 equipes em operação, seriam 3 caminhões de serviço circulando por dia e, com isso, a economia seria de aproximadamente R\$ 462,00/mês. Em um ano, a redução dos gastos com combustível é considerável, o que totalizaria R\$ 5.545,00 a menos no orçamento municipal. Visto isoladamente, este valor pode ser considerado irrisório para

um orçamento municipal. Destaca-se, no entanto, que se para cada processo ou serviço realizado fosse pensado em uma forma de se otimizar o tempo, ou até mesmo reduzir os desperdícios ou o uso exacerbado dos recursos, com certeza esses ganhos nos cofres públicos seriam muito mais representativos.

O mapa mostra uma seção da Rua da Floresta com suas interseções e rotas locais. Duas rotas principais são destacadas em azul: uma curta que liga a Rua da Floresta ao cruzamento com a Rua Princesa Isabel e a Rua Caramuru; e uma mais longa que continua ao longo da Rua da Floresta, passando por bairros como Vila Madalena, Vila Andrade, Vila Mariana e Vila Prudente.

inicialmente foram atendidos. Devido às rotas otimizadas apresentarem percursos reduzidos, há em decorrência a diminuição dos gastos com combustível e, indiretamente, minimização do tempo requerido para locomoção até os pontos, bem como, maior eficiência no atendimento da demanda de serviço.

Contudo, análogo ao que fora apontado por Medeiros e Kripka (2012), os métodos de otimização podem fornecer resultados aproximados para problemas combinatórios de grande dimensão, para os quais normalmente é necessário o emprego de métodos heurísticos para a obtenção de uma solução em tempo aceitável. Nestes casos, pela solução estar relacionada à calibração de parâmetros, ressalta-se a importância de conhecer as particularidades e limitações de cada método, de modo que se possa saber a sua aplicabilidade.



5 Considerações finais

Este trabalho possibilitou realizar a optimização de duas rotas operacionais percorridas no turno da manhã e da tarde por veículos que auxiliam na prestação do serviço de manutenção do sistema de iluminação pública municipal na cidade de Passo Fundo- RS. Foram propostas duas rotas otimizadas, correspondentes aos pontos percorridos pelas equipes nos respectivos turnos, as quais objetivaram a obtenção dos roteiros de menor distância. A proposta das rotas de menor distância foi obtida por meio da análise da rota diária praticada no turno da manhã e tarde por um caminhão da secretaria responsável.

Para as rotas otimizadas, obtidas a partir de modelagem numérica e optimização por meio do programa computacional LINGO, obteve-se que ambas as soluções ótimas resultaram em percursos mais curtos do que os realizados atualmente pelos veículos de serviço, até então traçados sem nenhum critério de optimização pré-definido. Na rota otimizada do turno da manhã conseguiu-se uma redução na distância total percorrida de aproximadamente 16,09%, enquanto que na do turno da tarde 12,03%. Em média demonstrou-se uma redução aproximada de 14,06%.

A partir da determinação dos menores percursos, que em ambos os casos implicaram em uma redução significativa da distância a ser percorrida, pode-se concluir que os objetivos inicialmente propostos no trabalho foram atendidos, uma vez que esta redução resulta em uma diminuição dos gastos com combustível, e indiretamente, minimização do tempo requerido para a locomoção até os pontos, bem como, maior eficiência no atendimento da demanda de serviço. Pode-se, portanto, atender maior número de pontos num mesmo período de trabalho.

Um maior atendimento da demanda de manutenção das luminárias que não estavam em

operação, ou seja, as quais apresentavam falhas, defeitos ou irregularidades, implica numa maior satisfação e prestação de serviços de qualidade à sociedade, a qual tem suas reivindicações atendidas e seu direito à segurança assegurado.

Por fim, evidencia-se que o uso de métodos de optimização, juntamente com ferramentas computacionais, aplicadas a problemas cotidianos e reais, a exemplo do estudo de caso apresentado neste trabalho, fornecem resultados eficazes e confiáveis. Tais métodos auxiliam no processo de tomada de decisões, uma vez que possibilitam prever e minimizar custos e gastos desnecessários, sejam estes de tempo, recursos físicos e/ou financeiros, bem como maximizar lucros, desempenho e produtividade.

Referências

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2010). *Resolução N° 414/2010 – Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada*. Recuperado em 11 dezembro, 2017, de, <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>.
- Assad, A. (1988). Modeling and implementation issues in vehicle routing. *Vehicle Routing: Methods and Studies*. B. L. Golden, A. A. Assad (eds), North Holland, Amsterdam, 7- 4.
- Baba, C. M., Corrêa, F. H. M., Souza, S. A. C. de, Wahba, T. M., & Medina, A. C. (2004). Otimização da colônia de formigas aplicada ao problema da programação e roteirização de veículos para o transporte de pessoas portadoras de deficiência. *Anais do XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Florianópolis, SC, Brasil.
- Ballou, R. H. (1993). *Logística empresarial*. São Paulo: Atlas.
- Barão, F. R., Kripka, M., & Kripka, R. M. L. (2009, jul/dez). Utilização de ferramentas de pesquisa operacional no suporte às tomadas de decisão na administração pública proposta de modelagem para coleta seletiva no município de Passo Fundo – RS. *Teoria e Evidencia Econômica (UPF)*, 14(31), 41-62.

- Benevides, P. F. (2011). *Aplicação de heurísticas e metaheurísticas para o problema do caixeiro viajante em um problema real de roteirização de veículos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Bodin, L.D., Golden, B., Assad, A., & Ball, M. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. *Computers and Operations Research*, 10(2).
- Brasil. (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.
- Christofides, N. E. (1979). The travelling Salesman Problem. *Combinatorial Optimization, Combinatorial Optimization*.
- Colin, E. C. (2007). *Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas*. Rio de Janeiro: LTC.
- Cordenonsi, A. Z., Müller, F. M., Bastos, F. da P. de, Araújo, F. V., & Elenusa, T. (2007). O LOBO e o Caixeteiro Viajante. *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Informática na Educação*. São Paulo: SBIE.
- Cunha, C. B. (2000). Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. *Transportes*, 8(2), 51-74.
- Cunha, C. B. da, Bonasser, U. de O., & Abrahão, F. T. M. (2002). Experimentos computacionais com heurísticas de melhorias para o problema do caixeteiro viajante. *Anais do XVI Congresso Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Natal, ANPET.
- Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2016). *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016, Ano base 2015*. Ministério de Minas e Energia. Recuperado em 11 dezembro, 2017, de <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202016.pdf>>.
- Garey, M. R., & Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: a Guide to the Theory of NP-Completeness*. New York: W. H. Freeman.
- Goldberg, M. C., & Luna, H. P. L. (2005). *Otimização Combinatória e Programação Linear*. Elsevier Editora.
- Guedes, A. da C. B., Leite, J. N. de F., & Aloise, D. J. (2005). Um algoritmo genético com infecção viral para o problema do caixeteiro viajante. *Publica*, 1, 16-24.
- Helsgaun, K. (2000). An effective implementation of the Lin-Kernighan Traveling Salesman Heuristic. *European Journal of Operational Research*, 126, 106-130.
- MAPS Google. (2017). *Google Maps*. Recuperado em 10 junho, 2017, de <<https://www.google.com.br/maps>>.
- Medeiros, G. F. de, & Kripka, M. (2012). Algumas aplicações de métodos heurísticos na otimização de estruturas. *Revista Ciatec (UPF)*, 4(1), 19-32.
- Melamed, I. I., Sergeev, S. I., & Sigal, I. K. (1990). The Traveling Salesman Problem. *Surveys: Plenum Publishing Corporation*, 1147-1173.
- Programa Nacional de Conservação de Energia – PROCEL. (2016). *Resultados PROCEL 2017, Ano base 2016*. Recuperado em 11 dezembro, 2017, de <http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2017/docs/rel_procel2017_web.pdf>.
- Reinelt, G. (1994). *The Traveling Salesman – Computational Solutions for TSP Applications*. Berlin: SpringerVerlag.
- Santos, C. R. A. *Iluminação Pública e Sustentabilidade Energética*. (2011). Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Schulz, W., Neto. (2010). *Iluminação Pública. Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar*. CREA-PR, 2010. Recuperado em 11 dezembro, 2017, de <<https://creajrpr.files.wordpress.com/2010/11/iluminac3a7c3a3o-pc3bablica.pdf>>.
- Selong, L. M., & Kripka, R. M. L. (2009). Otimização de roteiros: estudo de caso de uma distribuidora de ferro de Passo Fundo/RS para a região. *Revista Ciatec – UPF*, 1(1), 14-31.
- Silva, A. F., & Oliveira, A. C. de. (2006). Algoritmos genéticos: alguns experimentos com os operadores de cruzamento (“Crossover”) para o problema do caixeteiro viajante assimétrico. *Anais do XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção- ENEGEP*, Fortaleza, CE.
- Silva, D. F., & Sanches, A. L. (2009). Aplicação conjunta do método de Dijkstra e otimização combinatória para solução do problema do caixeteiro viajante. *Anais do XIV Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia-SEGET*, Resende, RJ.
- Souza, P. S. (1993). *Asynchronous organizations for multi-algorithms problems*. Ph. D. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering. Pittsburgh: Carnegie Mellon University. 139 p.
- Souza, M. J. F., Martins, A. X., Costa, T. A., Guimarães, F. A. C., Alves, J. M. do C. B., & Toffolo, T. A. M. (2012). *Manual do LINGO com Exercícios Resolvidos de Programação Matemática*. Departamento de Computação, Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto.

Recebido em 8 ago. 2017 / aprovado em 14 dez. 2017

Para referenciar este texto

Tormen, A. F., Pansera, G., & Kripka, M. Otimização das rotas para veículos de manutenção do sistema de iluminação pública na cidade de Passo Fundo (RS). *Exacta*, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 89-101, 2018.

