

**MODELAGEM DE UMA VERSÃO DO ALGORITMO  
PADRÃO DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE: O  
CASO DE UMA CENTRAL DE AMBULÂNCIAS**

**MODELING A VERSION OF THE STANDARD ALGORITHM  
OF THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM: THE CASE  
OF AN AMBULANCE CENTER**

**MODELIZACIÓN DE UNA VERSIÓN DEL ALGORITMO  
ESTÁNDAR PARA EL PROBLEMA DEL VENDEDOR  
VIAJERO: EL CASO DE UN CENTRO DE AMBULANCIAS**

Bruna Negris Suim<sup>1</sup>  
Nayara dos Santos Scarpati<sup>2</sup>  
Jailany do Rozario Clarindo<sup>3</sup>  
Wellington Gonçalves<sup>4</sup>

**Resumo:** A eficiência do serviço de transporte de pacientes é essencial não só para atendimentos, como também, pode salvar vidas, considerando as condições do trânsito urbano brasileiro atual. Neste serviço, as ambulâncias têm sido um recurso escasso, no contexto brasileiro, embora de elevada importância. Assim, consideramos uma situação com necessidade de soluções que auxiliem tomadas de decisões a partir de uma Central de Ambulâncias, usando o Problema do Caixeiro Viajante para encontrar a rota ideal. Os experimentos revelaram que a abordagem utilizada produz soluções relevantes, que podem ser empregadas em um curto tempo de resposta. A principal contribuição deste trabalho tem relação com os processos de planejamento e de decisão quanto ao uso de recursos, que, de acordo com a literatura, retrata uma das principais questões a serem constantemente conduzidas por gestores de unidades de saúde.

**Palavras-chave:** Áreas urbanas. Tomada de decisão. Problema do caixeiro viajante. Escolha da rota.

<sup>1</sup> Graduanda. Universidade Federal do Espírito Santo. <https://orcid.org/0009-0004-6680-4471>. E-mail: [bruna.suim@edu.ufes.br](mailto:bruna.suim@edu.ufes.br).

<sup>2</sup> Graduanda. Universidade Federal do Espírito Santo. <https://orcid.org/0009-0003-9120-2301>. E-mail: [nayara.scarpati@edu.ufes.br](mailto:nayara.scarpati@edu.ufes.br).

<sup>3</sup> Graduanda. Universidade Federal do Espírito Santo. <https://orcid.org/0009-0006-7528-8880>. E-mail: [jailany.clarindo@edu.ufes.br](mailto:jailany.clarindo@edu.ufes.br).

<sup>4</sup> Doutor. Universidade Federal do Espírito Santo. <https://orcid.org/0000-0002-7106-3637>. E-mail: [wellington.goncalves@ufes.br](mailto:wellington.goncalves@ufes.br).

**Abstract:** The efficiency of the patient transport service is essential not only for consultations, but also can save lives, considering the current Brazilian urban traffic conditions. In this service, ambulances have been a scarce resource in the Brazilian context, although of great importance. Thus, we consider a situation in need of solutions that help decision-making from an Ambulance Center, using the Traveling Salesman Problem to find the ideal route. The experiments revealed that the used approach produces relevant solutions, which can be employed in a short response time. The main contribution of this work is related to the planning and decision processes regarding the use of resources, which, according to the literature, portrays one of the main issues to be constantly addressed by managers of health units.

**Keywords:** Urban areas. Decision making. Traveling salesman problem. Route choice.

**Resumen:** La eficiencia del servicio de transporte de pacientes es fundamental no solo para consultas, sino que también puede salvar vidas, considerando las condiciones actuales del tráfico urbano brasileño. En este servicio, las ambulancias han sido un recurso escaso en el contexto brasileño, aunque de gran importancia. Así, nos planteamos una situación que necesita soluciones que ayuden a la toma de decisiones desde un Centro de Ambulancias, utilizando el Problema del Vendedor Viajero para encontrar la ruta ideal. Los experimentos revelaron que el enfoque utilizado produce soluciones relevantes, que pueden emplearse en un corto tiempo de respuesta. La principal contribución de este trabajo está relacionada con los procesos de planificación y toma de decisiones sobre el uso de los recursos, lo que, según la literatura, retrata una de las principales cuestiones a ser abordadas constantemente por los gestores de las unidades de salud.

**Palabras-clave:** Areas urbanas. Toma de decisiones. Problema del viajante de comercio. Elección de ruta.

Submetido 31/03/2023

Aceito 13/09/2023

Publicado 26/09/2023

## Introdução

O uso desordenado da terra nas cidades associado a uma mobilidade urbana complexa e de difícil gerenciamento tem contribuído, por diversas vezes, com a indisponibilidade de serviços essenciais à população, como por exemplo, a circulação adequada de ambulâncias. Embora políticas de cidades inteligentes prometam a melhora da qualidade de vida dos cidadãos, ainda estão aquém desta promessa (Richter *et al.*, 2022).

Essa opinião é corroborada por Jacobsen, Read e Saleur (2004) e Bertolini (2020) que destacam ser importante entender as diferentes realidades e propor soluções dinâmicas que possam colaborar com o coletivo, principalmente quando se trata de mobilidade urbana. Barrena *et al.* (2022) também estudaram o problema de roteamento em meio urbano e concluíram que não há uma solução única, ou padrão de solução que não possa ser atualizado.

Embora a literatura destaque diferentes resoluções do Problema do Caixeiro Viajante (PCV) para roteamentos diversos, devido ao elevado número de dimensões e variáveis que fazem parte do PCV, como também as suas variações e atualizações de perfis, exigirão sempre investigações parametrizáveis a estas condições (Letchford; Nasiri; Theis, 2013; Zhang; Han, 2022). Por este motivo e com o entendimento de que as circunstâncias urbanas mudam constantemente, Leonhard Euler estudou o problema do PCV avaliando um conjunto de cidades e distâncias entre cada par de cidades e, a partir disso, analisou a rota mais curta possível que visite cada cidade exatamente uma vez e retorne ao ponto de partida (Euler, 1759).

Para Aringhieri *et al.* (2022), Sarquis Júnior, Souza e Lira Lima (2022), o roteamento de ambulâncias faz parte das ações tomadas em resposta a solicitações pontuais de deslocamento. Essas ações incluem o emprego de planos de emergência e recursos designados que podem exigir o resgate imediato de pessoas; entregar pessoal, assistência médica e equipamentos a uma determinada área e ajudar a prevenir as perdas de infraestrutura e meio ambiente.

Por esse motivo, a necessidade de deslocamento de pacientes de uma região para outra deve ser entendido como um importante problema a ser gerenciado e solucionado com a máxima brevidade. Considerando este tipo de problema, Deineko, Van Dal e Rote (1994) e Boccia *et al.* (2021) destacam ser de elevada importância aplicar técnicas da Pesquisa Operacional a fim de contribuir com a melhora do desempenho operacional e otimizado de rotas.

De acordo com Gonçalves e Rocha (2020), a superpopulação das cidades associada a uma mobilidade deficitária indicam a necessidade de investigações que entendam e combinem as necessidades dos *stakeholders*. Dentro desse contexto, o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) se apresenta como um problema de otimização combinatorial no âmbito da Pesquisa Operacional, que consiste em encontrar o melhor trajeto a ser realizado, partindo de um vértice inicial e voltando para o mesmo ponto com o menor custo total de um percurso mínimo (Dumitrescu *et al.*, 2010; Akhand *et al.*, 2020). Devido a amplitude de possibilidades e desdobramentos, o PCV tem sido utilizado na literatura para contribuir com o planejamento, ações e gerenciamento de situações diversas que requeiram a otimização de rotas (Gutin; Karapetyan, 2010; Boccia *et al.*, 2021).

Analisando o contexto e trabalhos acima mencionados, pode-se dizer que a complexidade do algoritmo exato para resolver o PCV aumenta de acordo com o número de lugares a visitar e cenários. Por estes motivos, o trabalho tem como objetivo encontrar a rota ideal para reduzir a distância total percorrida por meio da resolução do PCV, considerando a oferta de serviços de deslocamento de pacientes do Sistema Único de Saúde, em quatro diferentes rotas, aplicando um modelo já desenvolvido em estudos anteriores (Dumitrescu *et al.*, 2010; Barrena *et al.*, 2022).

### **Potencialidades e tendências sobre o Problema do Caixeiro Viajante**

Classicamente, o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), como globalmente é conhecido, é entendido na literatura como um problema que visa determinar uma rota de quando alguém chegará a todos os locais que foram determinados (Euler, 1759; Ouenniche; Ramaswamy; Gendreau, 2017; Gonçalves; Rocha, 2020; Aringhieri *et al.*, 2022). Como passo inicial, a rota deve começar do primeiro local e, depois, visitar todos os locais indicados, exatamente uma vez (Akhand *et al.*, 2020). Depois disso, segundo Barrena *et al.* (2022), deve retornar ao primeiro local, objetivando sempre alcançar a menor distância total de viagem. De acordo com Euler (1759), corroborado por Akhand *et al.* (2020) e Barrena *et al.* (2022), o PCV pode ser entendido como um problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) que, de maneira geral, pode ser estabelecido da seguinte forma:

$n$  : número de nós a serem visitados;

$c_{ij}$  : distância do nó  $i$  ao nó  $j$ ;

$u_i$  : variáveis adicionais ao visitar o nó  $i$ .

E, se apresentado como variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se houver uma viagem do nó } i \text{ para nó } j; \\ 0, & \text{em caso contrário.} \end{cases}$$

Adicionalmente, a função objetivo do PCV vislumbra encontrar um valor para que minimize a distância total percorrida, isto é (Equação 1):

$$\min. z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Apresentando, com restrições, as seguintes condições:

a. Uma viagem poderá ocorrer uma única vez a um nó (Equações 2 e 3).

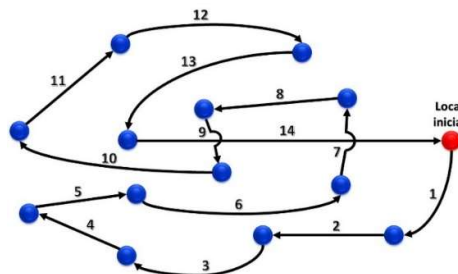
$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

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

b. Nenhuma rota poderá ser adicionada à viagem. Isso significa que há apenas um único roteamento no PCV (Equação 4) e, assim, a ação de retornar ao local inicial formará um ciclo (Figura 1):

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, \quad i \neq j, \quad \forall i = 2, 3, \dots, n; \quad \forall j = 2, 3, \dots, n; \quad u_j \geq 0. \quad (4)$$

Figura 1. Exemplo de uma rede no PCV



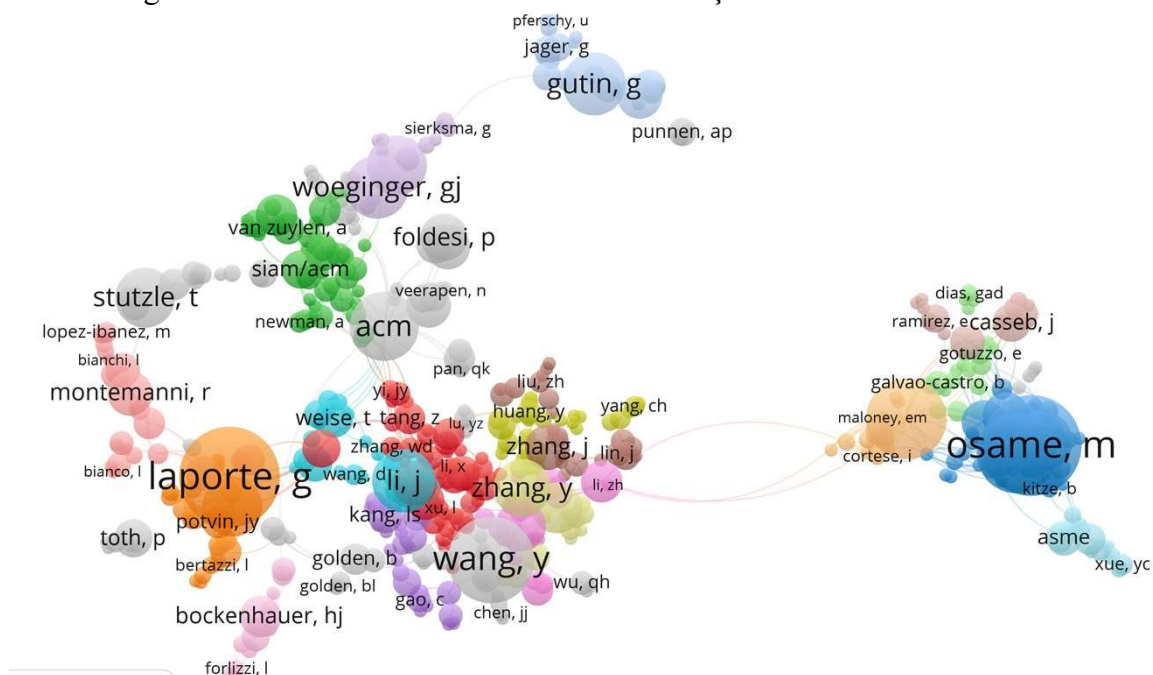
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Essa abordagem clássica tem sido estudada ao longo de décadas, e sua importância pode ser notada por meio de relevantes bases, como o Google Acadêmico (*Google Scholar*), que

apresentou um retorno de 250.000 obras acadêmicas e a *Web of Science* (WoS), que exibiu um total de 19.487 artigos científicos relacionados ao PCV, publicados a partir de 1945, escritos em inglês, em pesquisa feita entre 20 de junho e 29 de agosto de 2022, que continham em seu título ou resumo as palavras: *Traveling Salesman Problem*, ou TSP, ou *Multiple Traveling Salesman Problem*. Os resultados da pesquisa indicam um crescimento de publicações sobre o tema nos últimos 20 anos, visualizados por meio do software de *VOSviewer*, versão 1.6.18 (Figura 2).

Por este motivo, Akhand *et al.* (2020), Gonçalves e Rocha (2020), Mosayebi, Sodhi e Wettergren (2021) e Zhang e Han (2022) destacam a importância e capacidade de adaptabilidade do PCV a situações e cenários diversificados, podendo ser utilizado em diversas esferas, como no terceiro setor, iniciativa privada e setor público.

Figura 2. Autores com elevado número de citações relacionados ao PCV



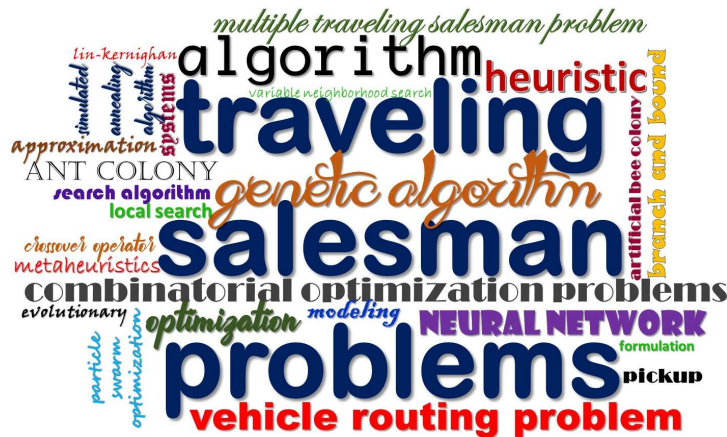
Fonte: *VOSviewer* (2022).

A partir desse contexto, além da identificação de autores que têm se destacado ao longo do tempo (1945-2022), por meio de citações – em média 18,92 por item, e acessos de suas obras, também houve a revelação de diferentes ênfases de usos do PCV (Figura 3). Sendo possível obter essa visualização por meio do arcabouço de artigos, que continham discursos



sobre programação matemática e modelos heurísticos aplicados. Dentro desse contexto, o arcabouço revelou uma multiplicidade de aplicações na literatura com elevada variação de aplicações e situações, corroborando com a opinião de importância e utilização do PCV.

Figura 3. *Word cloud* das principais palavras utilizadas pelos pesquisadores



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Contudo, é importante salientar que essas aplicações presentes na literatura nem sempre proporcionam a solução ideal (Boccia *et al.*, 2021). De outro modo, segundo Aringhieri *et al.* (2022), elas comumente encontram soluções que atendem a resolução de um dado problema de forma consistente. Para Gonçalves e Rocha (2020) e Li *et al.* (2023), essas soluções são frequentemente consideradas adequadas por serem encontradas em uma quantidade razoável de tempo. Na opinião de Samarakkody e Alagalla (2021), isso se explica devido à otimização, de maneira geral, em assumir o papel de apresentar uma possível solução em um intervalo de tempo admissível.

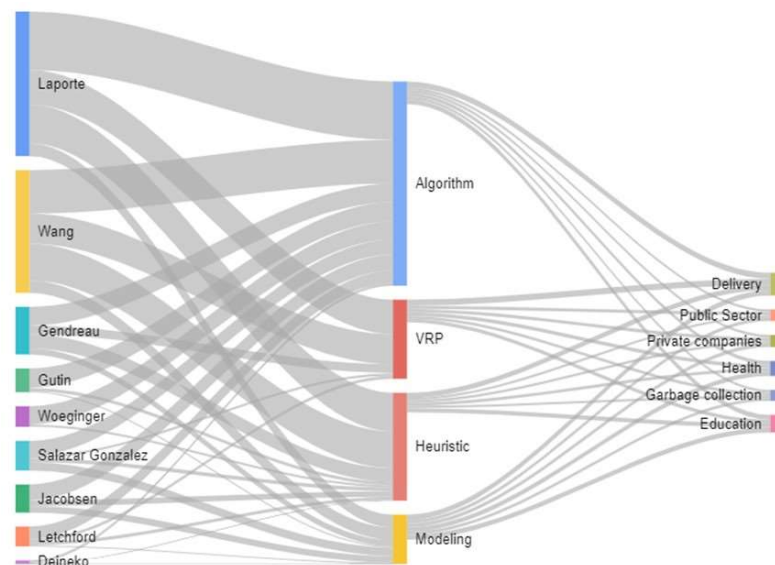
Por outro lado, ampliando-se o entendimento desses resultados, é possível verificar que a literatura sugere a existência de diversas disparidades entre o WoS e o Google *Scholar* e entre Google *Scholar* e o WoS, em relação às análises bibliométricas, sobretudo entre os 9 principais autores produtivos, citações, artigos mais influentes, ocorrências de palavras-chave e suas respectivas aplicações ou uso (Figura 4).

Na opinião de Gutin e Karapetyan (2010), Ouenniche, Ramaswamy e Gendreau (2017) e Mosayebi, Sodhi e Wettergren (2021), o PCV e a maioria de suas variantes se concentram em objetivos relacionados à duração da viagem. No entanto, para estes autores, existem aplicações

que exigem que um viajante se desloque por um conjunto de locais, inicie um trabalho em cada local e depois retorne à origem, podendo assim existir outros problemas dentro da proposta inicial.

A literatura apresenta diversas soluções (algoritmos e heurísticas) desenvolvidas para resolver o PCV, de maneira empírica ou aplicada. Comumente, essas soluções convencionais podem ser enquadradas em três categorias: elaboração de rotas, melhoria de rotas e abordagens compostas por elaboração e melhoria, sendo, inclusive, observado na literatura o emprego híbrido de técnicas e ferramentas, como por exemplo, a lógica *Fuzzy*.

Figura 4. Diagrama de Sankey – Abordagens e resiliência do PCV



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Para Dumitrescu *et al.* (2010), o *Vehicle Routing Problem* (VRP) ou Problema de Roteamento de Veículos (PRV), como também é conhecido na literatura, pode ser resolvido por meio de heurísticas, sendo a principal utilizada a modelagem com o PCV, ou algum algoritmo com origem em si mesmo. A afirmativa destes autores se baseia em resultados computacionais alcançados, os quais são capazes de resolver instâncias de otimalidade, envolvendo diversas solicitações de coleta e entrega. Corroborando com esta visão, Boccia *et al.* (2021) salientam que o PCV possui uma ampla capacidade adaptativa à inserção de dimensões e variáveis de uma dada condição ou problema, fato que foi comprovado ao se



verificar o uso de estratégias de fixação de variáveis e um conjunto original de desigualdades válidas, algo que fortaleceu ainda mais o algoritmo proposto.

Wang *et al.* (2015) destacam que, em sua ampla utilização na literatura, o PCV é empregado em ambientes determinísticos, os quais necessitam de uma ampliação de entendimento. Contudo, para estes autores, essa característica de utilização deve ser cuidadosamente observada, destacando-se que nem todos os ambientes são determinísticos, ou seja, em diversos casos – como os relacionados à área de saúde, o problema estudado não depende exclusivamente do estado atual ou da ação executada pelo agente.

De acordo com Ouenniche, Ramaswamy e Gendreau (2017), na prática, heurísticas para construção de rotas para o PCV ou híbridas, que combinam metodologias ótimas, por exemplo, são normalmente implementadas, na maioria dos softwares e aplicativos, para gerenciar realisticamente os requisitos computacionais dos tamanhos das instâncias que os profissionais precisam resolver. Além disso, Dumitrescu *et al.* (2010) e Echchakoui (2020) ressaltam que uma categoria específica de heurística tem atraído atenção considerável na literatura, ou seja, os algoritmos de busca local como a *Ant colonies*, que é uma heurística baseada em probabilidade.

Segundo Gutin e Karapetyan (2010), embora existam na literatura indicações de inúmeras mutações e modernidade de aplicações do PCV, é possível que sejam apresentadas novas propostas que incluam temas emergentes, os quais ainda não foram amplamente pesquisados e necessitam ser fortalecidos. Zhang e Han (2022) enfatizam que, embora o PCV seja um dos algoritmos mais utilizados em problemas de otimização combinatória discreta, a solução exata é mais complexa de alcançar, à medida que aumenta a escala.

Barvinok *et al.* (2003) relatam que a complexidade de um problema de otimização, em especial o PCV, não é apenas consequência de sua estrutura combinatória ou de sua geometria, mas pode ser regida pela estrutura da função de distância específica que é utilizada. Por esse motivo, Deineko, Van Dal e Rote (1994), Jacobsen, Read e Saleur (2004) e Letchford, Nasiri e Theis (2013) concordam que problemas intensamente relacionados possuem resultados semelhantes.

Embora haja na literatura um elevado número de proposições de algoritmos sobre soluções do PCV, as condições próprias de cada problema indicam possibilidades de combinação de abordagens, como o uso de *branch-and-cut* para resolver um problema de coleta

e entrega, em que os clientes aceitam ser atendidos em várias visitas (Hernández-Pérez; Salazar-Gonzalez, 2022). Na opinião de Dantzig e Ramser (1959), Barvinok *et al.* (2003), Wang *et al.* (2015) e Echchakoui (2020), é importante ressaltar que encontrar a carga de um veículo em cada arco para certificar a viabilidade de uma solução, é um problema complexo e de difícil resolução já abordado na literatura.

Os resultados das investigações da literatura revelaram que diversas variações do PCV têm utilizado propostas empregando o *Ant Colony System*, *Max-Min Ant System* e *Artificial Bee Colony Meta-Heuristic* e, com isso, alcançado respostas importantes em termos de qualidade da solução. Contudo, estes resultados também indicaram que há necessidade de investigações mais ampliadas sobre como parâmetros de construção modificam os seus efeitos no desempenho do algoritmo, como por exemplo – entender como o número de “formigas” e, também, conjuntos e subconjuntos de vizinhos mais próximos podem influenciar o desempenho do PCV.

### Abordagem metodológica

Neste trabalho, uma ambulância conduz pacientes a  $N$  locais de atendimento ou, ainda, em apoio a unidades de saúde (hospitais, pronto socorro, unidade básica de saúde e unidade de pronto atendimento) a partir de uma Central. Os pacientes têm uma opção de atendimento que é serem conduzidos até o local de destino designado pela Central, com um horário limite para tal e sua recondução de volta, após ter encerrado a rota estipulada para a ambulância. Assim, a hora de chegada ao local designado ou a Central deve atender às restrições da janela de tempo de trânsito impostas pelas rodovias federais e municípios limítrofes.

A unidade de pesquisa utilizada foi uma Central de Ambulâncias localizada em um município situado na microrregião Rio Doce (Espírito Santo - ES), responsável por atendimento 24h. Essa escolha foi devido à representatividade e importância que essa Central tem na região (Aringhieri *et al.*, 2022). No ano de 2022, por exemplo, foram realizados mais de 70 mil atendimentos, com uma frota composta por ambulâncias, micro-ônibus, vans, UTI Móvel e outros veículos.

Desta forma, a abordagem metodológica adotada neste trabalho considerou, além do problema de roteamento de veículos, os apontamentos de necessidades da região e os

*stakeholders* envolvidos diretamente na gestão e operação da Central (Samarakkody; Alagalla, 2021). Esta abordagem foi realizada em 5 etapas (Figura 5).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Por conseguinte, a problemática relacionada a identificar, entre as diferentes rotas, a ideal de cada PCV para atendimento à demanda da Central, foi definida por meio da obtenção de informações de acesso público, quais sejam: relatórios de viagens contendo horários de chegada e de partida, pontos de paradas, tempos de espera, caminhos percorridos e alguns detalhes técnicos de todo o atendimento, como intercorrências (Bertolini, 2020; Persyn; Díaz-Lanchas; Barbero, 2022). As informações de acesso público foram disponibilizadas pelo gestor da unidade de pesquisa, no dia 1 de julho de 2022, momento em que se realizou a primeira etapa.

Em seguida, a segunda etapa foi realizada com o apoio do gestor da unidade, sendo selecionadas quatro rotas mais complexas sob o aspecto operacional, realizadas entre os dias 20 a 24 de junho de 2022, para ser estudado um PCV de cada uma das rotas (Gonçalves; Rocha, 2020). Esse período foi selecionado por apresentar uma extensa dessemelhança entre rotas, ausência de problemas de manutenção com a frota e disponibilidade de dados, relacionados às características operacionais dessas rotas.

Dentro desse contexto e de acordo com Hernández-Pérez e Salazar-Gonzalez (2022), após a obtenção dos dados, foram traçados os caminhos e as distâncias entre um ponto de parada e outro de cada rota (terceira etapa). Para essa atividade, foi utilizado como ferramenta de apoio o *Google Maps* (Speth *et al.*, 2022), havendo a utilização de um fator de adequação das distâncias Euclidianas (distâncias métricas), conforme Ultsch e Lötsch (2022).

Na sequência, foi elaborada uma matriz Origem-Destino (OD) do tipo “De-Para”, a fim de representar as distâncias entre pontos das rotas selecionadas para posterior uso no PCV de cada uma destas (quarta etapa), conforme suscita Li *et al.* (2023). Após obtenção da matriz OD, conforme Zhang e Han (2022), o PCV sob a forma de PLIM foi modelado para cada rota escolhida no LINGO 19.0® (quinta etapa), tendo por princípio a formulação apresentada inicialmente por Euler (1759), ampliada matematicamente por Dantzig e Ramser (1959). Embora as rotas selecionadas apresentem instâncias relativamente pequenas, 4 locais cada, o uso do LINGO se justifica por sua usabilidade e ágil formulação de modelos, assim como, em resolver, avaliar ou adequar essa formulação com base nos resultados, possibilitando modificações rápidas e repetição do processo. As simulações foram realizadas em um notebook equipado com processador Intel Core I7 - 12700 Hz (14-core, cache de 4,7 GHz) com 32 GB de RAM.

### Resultados e discussão

A unidade de pesquisa foi selecionada por apresentar uma elevada demanda no atendimento à população da região norte. Isso se explica, em parte, a falta de atendimento adequado, o que suscita em uma busca por recursos diversificados na área da saúde que, na maioria das vezes, estão em Vitória – capital do Estado do Espírito Santo. No período de coleta de dados junto à Central, a frota era composta por: 22 ambulâncias; 3 micro-ônibus; 5 vans; 3 UTI Móvel e outros 34 veículos (incluindo carros de passeio).

Os apontamentos levantados revelaram que a maioria dos 70 mil atendimentos, realizados em 2022, aconteceram em deslocamentos para hospitais (83,2%), seguido de ambulatorios (11,5%) e clínicas (5,3%), respectivamente. Esses números explicam, em parte, a extensa dessemelhança encontrada entre rotas da Central. Para Aringhieri *et al.* (2022), esse fenômeno se explica devido à elevada concentração de atendimentos associada a um ambiente urbano que cotidianamente tem apresentado condições complexas no fluxo de trânsito. O apoio a esse paradigma tem sustentação na literatura (Bertolini, 2020; Mosayebi; Sodhi; Wettergren, 2021; Barrena *et al.*, 2022; Hernández-Pérez; Salazar-Gonzalez, 2022; Richter *et al.*, 2022).

A primeira etapa da abordagem metodológica obteve as informações, de acesso público, relacionadas às rotas utilizadas na Central através do relatório de viagens que continha: principais gargalos ao longo dos atendimentos; trajetos realizados (para atender diretamente

pacientes); apoio a unidades de saúde e traslados diversos; limitações estruturais; disponibilidade de recursos humanos capacitados e condições da frota atual (Bertolini, 2020). A partir desses relatórios, foi possível conhecer os caminhos percorridos, bem como os respectivos horários de chegada e de partida, pontos de paradas e tempos de espera, caracterizando, assim, de acordo com o gestor, todo o serviço da Central.

Na segunda etapa, foram identificadas as quatro rotas mais complexas sob o aspecto operacional, sendo estas rotas ratificadas pelo gestor da unidade de pesquisa. Contudo, é importante destacar que o período selecionado para análise apresentou uma extensa dessemelhança entre rotas, fato que, de acordo com o gestor, traria resultados mais próximos da realidade da Central (Gonçalves; Rocha, 2020). Além disso, essas rotas apresentaram, no período escolhido para análise, ausência de problemas de manutenção com a frota, e todas as informações relacionadas às características operacionais dessas rotas estavam disponíveis publicamente. Dessa forma, de acordo com Samarakkody e Alagalla (2021), essa ausência auxilia na sustentação dos resultados obtidos em simulações de problemas que envolvem roteamento de veículos.

A partir da seleção das rotas, a terceira fase da operacionalização metodológica (Percurso) teve início com o levantamento das distâncias percorridas entre um ponto de parada e outro de cada rota definida anteriormente para serem utilizadas em cada PCV (Hernández-Pérez; Salazar-Gonzalez, 2022). Logo depois, foi feita a escolha de caminhos a serem percorridos, tendo como princípios a economia de distância e também de escala temporal necessária para atender às rotas sugeridas (Aringhieri *et al.*, 2022; Oliveira Chagas *et al.*, 2022; Zhang; Han, 2022). Considerando esses princípios, foi realizado um arranjo geográfico dos pontos de paradas (Figura 6), ocorridos entre os dias 20 e 24 de junho de 2022, tendo como origem a Central de Ambulâncias (Linhares), utilizando-se carros de passeio para os traslados – ou seja, veículos capacitados, utilizando o Google Maps (Speth *et al.*, 2022).



Figura 6. Visualização do roteamento de veículos nas rotas mais complexas



Fonte: Google Maps (2022).

Na obtenção das distâncias entre pontos de parada, foram consideradas particularidades de movimentação de cada ponto a ser visitado. Isso ocorreu devido aos diversificados horários de saída – Rota 1: 3h 30min.; Rota 2: 7h; Rota 3: 10h e Rota 4: 3h (Zhang; Han, 2022) – exemplificados na Tabela 1, que causam dependência nos tempos de viagem, e, em decorrência disso, a necessidade de ponderar janelas de tempo condizentes a cada um dos pontos (Barrena *et al.*, 2022).

Tabela 1 - Parâmetros temporais dos pontos de atendimento - Rota 1

Pontos	Tempo de deslocamento	Horário de Chegada	Horário de saída
B	3h 20min.	6h 50min.	7h
C	9min.	7h 9min.	10h 49min.
D	11min.	11h	11h 10min.
A	3h 30min.	14h 40min.	---

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).



Assim sendo, utilizando os dados obtidos no arranjo (Figura 6) e examinando os pontos nos gráficos, que correspondem às localizações dos locais de atendimento de usuários e/ou em apoio a unidades de saúde, que tinham agendas, em que a Central de Ambulância é simbolizada pelo ponto A (Figura 6), as distâncias entre esses pontos foi corrigida por meio de um fator de adequação igual a 1,23 obtido por meio da média entre as distâncias das rotas (Ultsch; Lötsch, 2022).

Em seguida, as paradas foram ordenadas alfabeticamente e, desta forma, a primeira é representada pela letra B, a segunda pela letra C e assim sucessivamente. A partir disso, seguindo os preceitos da literatura (Li *et al.*, 2023), foi possível analisar as distâncias entre os pontos e determinar a distância total de cada rota (Rota 1 com 281.100 m; Rota 2 com 543.000 m; Rota 3 com 286.090 m e Rota 4 com 541.000 m), que compôs a matriz OD (Tabela 2).

Tabela 2 - Compilação entre pontos de atendimento (metros)

Pontos	Rota 1				Rota 2			
	A	B	C	D	A	B	C	D
A	0	140.000	141.600	138.000	0	139.000	278.000	139.000
B	140.000	0	1.600	0	139.000	0	132.000	0
C	141.600	1.600	0	1.500	278.000	132.000	0	133.000
D	138.000	0	1.500	0	139.000	0	133.000	0

Pontos	Rota 3				Rota 4			
	A	B	C	D	A	B	C	D
A	0	133.000	143.000	133.000	0	133.000	143.000	133.000
B	133.000	0	10.000	0	133.000	0	10.000	0
C	143.000	10.000	0	10.090	143.000	100.00	0	10.090
D	133.000	0	10.090	0	133.000	0	10.090	0

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Considerando o trabalho de Zhang e Han (2022), eles sugerem a realização de modelagem computacional para resolução de problemas relacionados a roteamento de veículos, devido ao elevado número de interações que podem surgir durante as análises. Por este motivo, neste trabalho, essa modelagem consistiu na implementação de uma versão do PCV sob a forma de PLIM no LINGO (Figura 7), conforme Zhang e Han (2022). Contudo, é importante ressaltar que há dependência dos tempos de viagem para obtenção das distâncias utilizadas pelas ambulâncias entre os pontos (parada e partida) a serem visitados, os quais foram considerados na formulação da Tabela 2 (Barrena *et al.*, 2022).

Figura 7. Modelagem de uma versão do algoritmo padrão do PCV

```
Lingo Model - Modeling a version of the standard TSP algorithm
sets:
pontos / A B C D/;;
matriz(pontos,pontos) : dist, x, f;
endsets
data:
dist = 0    x12  x13  x14
        x21  0    x23  x24
        x31  x32  0    x34
        x41  x42  x43  0;|
enddata
! Minimiza a distância total percorrida;
[fo] min = @sum (matriz(i,j) : dist(i,j) * x(i,j));
! A cada ponto j só chega uma aresta;
@for (pontos(j) : @sum (pontos(i) : x(i,j)) = 1);
! De cada ponto i só sai uma aresta;
@for (pontos(i) : @sum (pontos(j) : x(i,j)) = 1);
! O fluxo que chega a um ponto j, exceto a origem, menos o que sai é igual a uma unidade;
@for (pontos(j) | j #ne# 1 : @sum (pontos(i) : f(i,j)) - @sum (pontos(i) : f(j,i)) = 1);
! O fluxo máximo em cada aresta é (n-1), onde n é o número de pontos;
@for (matriz(i,j) : f(i,j) <= (@size (pontos) - 1) * x(i,j));
! A variável x(i,j) deve ser binária;
@for (matriz(i,j) : @bin (x(i,j)));
```

Fonte: Zhang e Han (2022).

De acordo com os resultados numéricos, o LINGO realizou as simulações com um tempo médio computacional de 0,08 segundos para encontrar rotas ótimas (Figura 8), considerando a compilação entre pontos de atendimento (Tabela 2). Quando o tamanho do problema aumenta para 15 rotas, o LINGO leva aproximadamente 0,53 segundos para obter a solução ótima global e isso se repetiu até 30 rotas com o mesmo número de pontos a serem visitados. Contudo, quando o número de rotas aumenta para 20 e o número de pontos aumentou para 10, o LINGO não consegue encontrar a solução ótima global dentro de um tempo aceitável de 2 horas.

Entretanto, o problema de pesquisa também foi resolvido por meio do método de Clarke e Wright (1964), usando uma versão do algoritmo padrão desse método no LINGO, o qual retornou uma solução ótima em aproximadamente 0,03 segundos. Embora a heurística tenha apresentado um resultado satisfatório computacionalmente, de acordo com Mikchailovitch (2019), a modelagem desse método é complexa, o que torna plausível – em termos de replicabilidade, utilizar uma versão do algoritmo padrão do PCV no problema investigado na unidade de pesquisa (Letchford; Nasiri; Theis, 2013; Zhang; Han, 2022).

Esse achado corrobora com a opinião de Mosayebi, Sodhi e Wettergren (2021), quando destacam que se o problema é mais complexo já que uma solução ótima não pode ser encontrada em um tempo inaceitável. Isso se explica devido ao algoritmo exato do PCV possuir a limitação de resolver apenas problemas de reduzidas proporções para roteirizações como o aqui estudado.

Figura 8. Uso da modelagem elaborada - dados da rota 1

```
Lingo Model - ROTA 1
sets:
pontos / A B C D /;;
matriz(pontos,pontos) : dist, x, f;
endsets

data:
dist =
0      140000  141600  138000
140000  0      1600    0
141600  1600  0      1500
138000  0      1500   0;
enddata

! Minimiza a distância total percorrida;
[fo] min = @sum (matriz(i,j) : dist(i,j) * x(i,j));
! A cada ponto j só chega uma aresta;
@for (pontos(j) : @sum (pontos(i) : x(i,j)) = 1);
! De cada ponto i só sai uma aresta;
@for (pontos(i) : @sum (pontos(j) : x(i,j)) = 1);
! O fluxo que chega a um ponto j, exceto a origem, menos o que sai é igual a uma unidade;
@for (pontos(j) | j #ne# 1 : @sum (pontos(i) : f(i,j)) - @sum (pontos(i) : f(j,i)) = 1);
! O fluxo máximo em cada aresta é (n-1), onde n é o número de pontos;
@for (matriz(i,j) : f(i,j) <= (@size (pontos) - 1) * x(i,j));
! A variável x(i,j) deve ser binária;
@for (matriz(i,j) : @bin (x(i,j)));
```

Fonte: Autores com base em Zhang e Han (2022).

A partir da implementação do algoritmo do PCV no LINGO, foram obtidas soluções ótimas e, à vista disso, agrupadas em uma matriz binária, na qual a variável assume valor 1, caso o link de caminho seja selecionado, ou 0 se acontecer o contrário, conforme sugerem Boccia *et al.* (2021) e Barrena *et al.* (2022). Para a Rota 1, a solução encontrada realizou 28 iterações em 0,07 segundos com 28 restrições e 32 variáveis, de forma que foi possível obter o seguinte roteiro de destinos: Ponto A – Ponto B – Ponto C – Ponto D – Ponto A, em um total de 281.100 metros percorridos. A solução encontrada embora não apresente ganho no total percorrido, promove uma alternativa de circulação (Tabela 3). Sendo importante para a tomada de decisão in loco em caso de alguma intercorrência na sequência inicial estabelecida.

Tabela 3 - Compilação entre pontos de atendimento - Rota 1 (metros)

Rota	Interações	Processamento (Segundos)	Roteiro	Percurso (m)
2	28	0,08	A → B → C → D → A	543.000
3	20	0,09	A → C → B → D → A	286.000
4	28	0,08	A → B → C → D → A	541.000

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Complementando esse resultado, é possível verificar que para as quatro rotas, o PCV de cada uma, permitiu uma redução média de 0,03% da distância atual percorrida por viagem, além da possibilidade de se usar rotas alternativas. De acordo com Bertolini (2020), em meio

urbano, rotas alternativas proporcionam importantes ganhos em termos de tempo de deslocamento, economia de combustível, manutenção e outras despesas decorrentes. Esse pensamento também é corroborado por Aringhieri *et al.* (2022), que enfatiza que a mobilidade, em termos de tempo de viagem, é extremamente importante quando se trata de deslocamento por ambulância nas cidades.

Segundo Oliveira Chagas *et al.* (2022) e Persyn, Díaz-Lanchas e Barbero (2022), em média, o custo mensal de manutenção da frota da unidade de pesquisa gira em torno de R\$ 386.000,00, havendo ainda um dispêndio de R\$ 219.382,80 com pedágio, considerando o trajeto de ida e volta até Vitória (ES) e um consumo estimado de combustível no valor de R\$ 977.504,48. Por outro lado, vale ressaltar que embora numericamente o valor da redução média da distância atual possa matematicamente sugerir ser irrelevante, é necessário considerar que a unidade de pesquisa realiza elevado número de viagens com percursos e pontos iguais ou parecidos por semana e em todos os dias úteis do ano (e aos fins de semana em casos de urgência), utilizando toda a frota.

Em síntese, a redução média da distância atual percorrida por viagem para a unidade de pesquisa – ponderando o planejamento, gerenciamento e desembolso da gestão brasileira com ambulâncias, micro-ônibus, vans, UTI Móvel e outros veículos (incluindo carros de passeio) e, de acordo com Oliveira Chagas *et al.* (2022) e Persyn, Díaz-Lanchas e Barbero (2022), esse montante representa uma economia em torno de R\$ 254.272,00, por ano. Na opinião de Sarquis Júnior, Souza e Lira Lima (2022), essa economia é uma significativa folga que pode ser direcionada a outros investimentos, ponderando, no caso brasileiro, por exemplo, a Lei Orçamentária Anual (LOA) que enseja um planejamento no ano anterior a sua execução.

Considerando que a unidade de pesquisa é um organismo dentro do setor público e que, de maneira geral no cenário atual dos municípios brasileiros, há um orçamento já apertado devido ao aumento das demandas de saúde nos últimos anos (Gigante; Azevedo, 2022), gerando um desafio para a operação e manutenção da frota. Portanto, a economia alcançada, com os resultados deste trabalho, propicia subsídios para tomadas de decisão e, por conseguinte, folgas no orçamento, que possibilitam diferentes horizontes de planejamentos, tais como: influenciar na redução do longo tempo de inatividade de unidades de frota, flexibilidade de programações de atendimento e otimização dos tempos de deslocamentos, por exemplo.

### Considerações finais

A elevada variação na demanda e os impactos, que atingem a saúde da população, levaram os gestores à preocupação sobre a adequada alocação das operações de roteamento de veículos, visto que um gerenciamento de rotas eficiente é, por vezes, decisivo para resultados expressivos em uma gestão.

Outrossim, consoante a essa variação, apresentamos uma abordagem algorítmica de simplificada implementação que auxilia a gestão pública com relação à programação de rotas de ambulâncias por meio do Problema do Caixeiro Viajante (PCV). De tal modo, também mostramos que esta abordagem pode ser estendida para contribuir com outros problemas de gestão (pública e privada) conhecidos e relatados na literatura. Os experimentos computacionais sugerem que a abordagem proposta melhora consideravelmente o desempenho da gestão da frota, permitindo com isso uma ampliação das possibilidades orçamentárias de investimentos, relatadas na literatura. Ademais, esta abordagem algorítmica também pode ser benéfica para auxiliar na resolução de diferentes problemas de roteamento que envolvem estudos comparativos das restrições que eliminam sub-rotas.

Como premissa básica, este trabalho assumiu que cada local, para atender um ou mais pacientes, pode ser visitado exatamente uma vez, e, na rota da ambulância, caso haja outros pontos a serem visitados, esta não pode esperar além de uma fração de tempo previamente estabelecida e, dessa forma, s serem atendidos no caminho inverso da rota (retorno a origem - embarque). Assim, ao realizarmos uma análise de sensibilidade, investigando o efeito do relaxamento dessas premissas nos tempos de desembarque (iterações), houve indícios da melhora do tempo de utilização operacional.

A principal contribuição deste trabalho diz respeito aos processos de planejamento e de decisão de utilização de recursos, que, de acordo com a literatura, representa uma das principais questões a serem constantemente conduzidas por gestores de unidades de saúde. Em vista disso, este trabalho se mostra de distinta relevância ao contribuir para o aumento da eficiência nos processos de decisão, de planejamento e de gestão de recursos, de forma a ampliar a cobertura total da área de atendimento (desembarque e embarque) e, também, a oferta de um serviço com mais resolutividade.

Além disso, este trabalho apresenta o uso encadeado de técnicas de análise bibliométrica, inovando ao averiguar a existência de soluções viáveis na análise e solução do

PCV aplicadas a pequenas redes. Efetivamente, este uso pode ser considerado um subproduto do trabalho como um todo, embora seja de fundamental importância para a pesquisa, devido a possibilitar a identificação dos principais autores relacionados ao PCV, assim como, as técnicas utilizadas e seus contextos para aplicação.

Entretanto, este trabalho pode ser ampliado com a realização de um estudo adicional em que, a partir de uma análise bibliométrica e revisão sistemática, considere novas abordagens para o desempenho da resolução do PCV. Outrossim, também há potencial de investigação ao se realizar reprogramação de rotas em tempo real com o uso coordenado de drones ou aplicativos de monitoramento de fluxo de trânsito e, assim, diferentes ambulâncias com distintos destinos podem retornar resultados desafiadores.

#### **Agradecimentos/ Apoio técnico**

Agradecemos ao Laboratório de Pesquisa Operacional, Logística e Transporte (POLT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)/Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES) pelo apoio acadêmico e técnico na concepção e desenvolvimento deste trabalho.

#### **Referências**

AKHAND, M. A. H.; AYON, S. I.; SHAHRIYAR, S. A.; SIDDIQUE, N.; ADELI, H. Discrete spider monkey optimization for travelling salesman problem. **Applied Soft Computing**, v. 86, p. 105887, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568494619306684>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

ARINGHIERI, R.; BIGHARAZ, S.; DUMA, D.; GUASTALLA, A. Fairness in ambulance routing for post disaster management. **Central European journal of operations research**, v. 30, n. 1, p. 189-211, 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10100-021-00785-y>>. Acesso em: 18ago. 2022.

BARRENA, E.; CANCA, D.; COELHO, L. C.; LAPORTE, G. Analysis of the selective traveling salesman problem with time-dependent profits. **TOP**, p. 1-29, 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11750-022-00632-6>>. Acesso em: 18 ago. 2022.

BARVINOK, A.; FEKETE, S. P.; JOHNSON, D. S.; TAMIR, A.; WOEGINGER, G. J.; WOODROOFE, R. The geometric maximum traveling salesman problem. **Journal of the ACM**, v. 50, n. 5, p. 641-664, 2003. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/876638.876640>>. Acesso em: 21 ago. 2022.



- BERTOLINI, L. From “streets for traffic” to “streets for people”: can street experiments transform urban mobility? **Transport reviews**, v. 40, n. 6, p. 734-753, 2020. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01441647.2020.1761907>>. Acesso em: 16 ago. 2022.
- BOCCIA, M.; MASONE, A.; SFORZA, A.; STERLE, C. A column-and-row generation approach for the flying sidekick travelling salesman problem. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 124, p. 102913, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X20308123>>. Acesso em: 16 ago. 2022.
- CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. **Operations research**, v. 12, n. 4, p. 568-581, 1964. Disponível em: <<https://pubsonline.informs.org/doi/epdf/10.1287/opre.12.4.568>>. Acesso em: 01 set. 2023.
- DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. **Management science**, v. 6, n. 1, p. 80-91, 1959. Disponível em: <<https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.6.1.80>>. Acesso em: 03 set. 2022.
- DEINEKO, V. G.; VAN DAL, R.; ROTE, G. The convex-hull-and-line traveling salesman problem: A solvable case. **Information Processing Letters**, v. 51, n. 3, p. 141-148, 1994. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0020019094000719>>. Acesso em: 16 ago. 2022.
- DUMITRESCU, I.; ROPKE, S.; CORDEAU, J. F.; LAPORTE, G. The traveling salesman problem with pickup and delivery: polyhedral results and a branch-and-cut algorithm. **Mathematical Programming**, v. 121, p. 269-305, 2010. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10107-008-0234-9>>. Acesso em: 26 set. 2022.
- ECHCHAKOUI, S. Why and how to merge Scopus and Web of Science during bibliometric analysis: the case of sales force literature from 1912 to 2019. **Journal of Marketing Analytics**, v. 8, p. 165-184, 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1057/s41270-020-00081-9>>. Acesso em: 4 out. 2022.
- EULER, L. Solution d’une question curieuse qui ne paraît soumise à aucune analyse. **Mémoires de l’Académie Royale des Sciences et Belles Lettres**, v. 15, p. 310-337, 1759. Disponível em: <<https://scholarlycommons.pacific.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1308&context=euler-works>>. Acesso em: 18 ago. 2022.
- GIGANTE, R. L.; AZEVEDO, A. T. Study of the impact of the start time of work shift on the efficiency of an emergency system through a simulation model of discrete events. **Gestão & Produção**, v. 29, e4421 2022. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/gp/a/pxMV8s6Qzcg7z93D53fCkm/abstract/?lang=en>>. Acesso em: 16 ago. 2022.
- GONÇALVES, W.; OLIVEIRA, M. S.; ROCHA, A. R. Algoritmo genético aplicado ao problema de roteamento de veículos: problema do caixeiro viajante no setor varejista. **Cadernos UniFOA**, v. 15, n. 43, p. 11-23, 2020. Disponível em: <<https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/3273>>. Acesso em: 19 ago. 2022.

GUTIN, G.; KARAPETYAN, D. A memetic algorithm for the generalized traveling salesman problem. **Natural Computing**, v. 9, n. 1, p. 47-60, 2010. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11047-009-9111-6>>. Acesso em: 7 out. 2022.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, H.; SALAZAR-GONZÁLEZ, J. J. A branch-and-cut algorithm for the split-demand one-commodity pickup-and-delivery travelling salesman problem. **European Journal of Operational Research**, v. 297, n. 2, p. 467-483, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221721004689>>. Acesso em: 4 out. 2022.

JACOBSEN, J. L.; READ, N.; SALEUR, H. Traveling salesman problem, conformal invariance, and dense polymers. **Physical review letters**, v. 93, n. 3, p. 038701, 2004. Disponível em: <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.93.038701>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

SARQUIS JÚNIOR, M. C.; SOUZA, R. P.; LIRA LIMA, V. M. Construção jurídica do sistema orçamentário nacional: do orçamento público e seus princípios formadores. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 3, p. 19289-19306, 2022. Disponível em: <<https://scholar.archive.org/work/vuxrioyjrjgatmbhaa6el4zhdu/access/wayback/https://brazilianjournal.com/index.php/BRJD/article/download/45374/pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2022.

LETFORD, A. N.; NASIRI, S. D.; THEIS, D. O. Compact formulations of the Steiner traveling salesman problem and related problems. **European Journal of Operational Research**, v. 228, n. 1, p. 83-92, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722171300091X>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

LI, W.; WANG, C.; HUANG, Y.; CHEUNG, Y. M. Heuristic smoothing ant colony optimization with differential information for the traveling salesman problem. **Applied Soft Computing**, v. 133, p. 109943, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494622009929>>. Acesso em: 27 set. 2022.

MIKCHAILOVITCH, A. S. Local search metaheuristics for capacitated vehicle routing problem: a comparative study. **Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS**, v. 31, n. 4, p. 121-138, 2019.

MOSAYEBI, M.; SODHI, M.; WETTERGREN, T. A. The traveling salesman problem with job-times (tspj). **Computers & Operations Research**, v. 129, p. 105226, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054821000186>>. Acesso em: 13 set. 2022.

OLIVEIRA CHAGAS, U.; SALTON, R. A. B.; SANTOS ARENAS, M. V.; SOUZA, V. B. P. Efetividade do princípio da economicidade na contratação de serviço de aluguel de veículos pela administração pública, realidade ou ficção? **Conjecturas**, v. 22, n. 2, p. 381-400, 2022. Disponível em: <<http://www.conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/678>>. Acesso em: 7 nov. 2022.

OUENNICHE, J.; RAMASWAMY, P. K.; GENDREAU, M. A dual local search framework for combinatorial optimization problems with TSP application. **Journal of the Operational Research Society**, v. 68, n. 11, p. 1377-1398, 2017. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1057/s41274-016-0173-4>>. Acesso em: 17 set. 2022.

PERSYN, D.; DÍAZ-LANCHAS, J.; BARBERO, J. Estimating road transport costs between and within European Union regions. **Transport Policy**, v. 124, p. 33-42, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X20301827>>. Acesso em: 29 ago. 2022.

RICHTER, M. A.; HAGENMAIER, M.; BANDTE, O.; PARIDA, V.; WINCENT, J. Smart cities, urban mobility and autonomous vehicles: How different cities needs different sustainable investment strategies. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 184, p. 121857, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004016252200381X>>. Acesso em: 18 ago. 2022.

SAMARAKKODY, T.; ALAGALLA, H. Optimizing the multiple trip vehicle routing plan for a licensee green tea dealer in Sri Lanka. **Modern Supply Chain Research and Applications**, v. 3, n. 4, p. 246-261, 2021. Disponível em: <<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/MSCRA-10-2020-0027/full/html>>. Acesso em: 21 ago. 2022.

SPETH, D.; SAUTER, V.; PLÖTZ, P.; SIGNER, T. Synthetic European road freight transport flow data. **Data in brief**, v. 40, p. 107786-107786, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235234092101060X>>. Acesso em: 21 ago. 2022.

ULTSCH, A.; LÖTSCH, J. Euclidean distance-optimized data transformation for cluster analysis in biomedical data (EDOtrans). **BMC bioinformatics**, v. 23, n. 1, p. 1-18, 2022. Disponível em: <<https://bmcbioinformatics.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12859-022-04769-w>>. Acesso em: 21 ago. 2022.

WANG, Z.; GUO, J.; ZHENG, M.; WANG, Y. Uncertain multiobjective traveling salesman problem. **European Journal of Operational Research**, v. 241, n. 2, p. 478-489, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221714007334>>. Acesso em: 21 set. 2022.

ZHANG, Z.; HAN, Y. Discrete sparrow search algorithm for symmetric traveling salesman problem. **Applied Soft Computing**, v. 118, p. 108469, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568494622000321>>. Acesso em: 16 ago. 2022.