

APLICAÇÃO DE ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE: UM ESTUDO VOLTADO À OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ENTREGA DE UMA EMPRESA

Melissa Vicenzi Fioreli (Faculdade CESURG Marau) melissafioreli@cesurg.com
Manoela Rizzardo Franceschi (Faculdade CESURG Marau) manoelarf@cesurg.com
Marciane Paula Lorenzetti (Faculdade CESURG Marau) lorenzettimarciane@gmail.com
Igor Bosa (Faculdade CESURG Marau) igorbosa@cesurg.com

Resumo

A seleção de rotas mais eficientes consiste em um dos desafios mais críticos que as empresas enfrentam atualmente, sendo responsável pela maior parcela de custos logísticos. Uma das técnicas que podem ser aplicadas para a otimização de rotas são os Algoritmos Evolucionários, os quais consistem em uma poderosa ferramenta para a soluções de problemas com alto nível de complexidade. Desse modo, o presente estudo buscou calcular, a partir da aplicação de um Algoritmo Evolucionário, otimizar a rota realizada pelo veículo de entrega utilizado por uma fornecedora/lavanderia de uniformes profissionais. Para tanto, realizou-se a modelagem da situação problema através do Problema do Caixeiro Viajante. A partir da execução do algoritmo, foi possível encontrar duas possibilidades de rotas, ambas com o total de 503,9 km, a qual, após a realização de algumas iterações nas quais foram alterados parâmetros de controle da execução, pode-se confirmar que consistia na rota mais curta. Além disso, os resultados evidenciam que a aplicação de Algoritmos Evolucionários na resolução do Problema do Caixeiro Viajante possibilita otimizar rotas de maneira eficiente, mesmo em situações em que existe um número elevado de possíveis rotas.

Palavras-Chaves: *Algoritmo Evolucionário. Problema do Caixeiro Viajante. Otimização. Roteirização. Pesquisa Operacional.*

1. Introdução

A eficiência com que são realizadas as atividades de transporte impactam a competitividade das organizações (García-Arca; Garrido; Prado-Prado, 2016), pois, os gastos com transporte representam uma parcela considerável dos custos (Bremenkamp et al., 2016). Tendo-se em vista que tendem a ocorrer desperdícios nas operações logísticas (Miranda; Soliani; Freitas, 2021; Palhares; Araújo, 2018), torna-se imprescindível que as organizações procurem técnicas

que permitam reduzi-los de modo a obter uma maior eficiência (Bremenkamp et al., 2016; Palhares; Araújo, 2018).

A seleção de rotas mais eficientes pode auxiliar na redução de tais custos e na mitigação de potenciais desperdícios (Stolk, et al., 2013), sendo essencial que as organizações empreguem planos de roteirização estruturados (Palhares; Araújo, 2018). O estabelecimento de um roteiro de distribuição razoável gera benefícios significativos, tanto em relação ao custo operacional e velocidade, como na eficiência de todo o transporte logístico (Chen et al., 2019; Melo; Ferreira Filho, 2001).

Uma alternativa para seleção de rotas mais eficientes é a aplicação do Problema do Caixeiro Viajante (PCV) (Miranda; Soliani; Freitas, 2021). O PCV busca determinar o caminho mais curto possível que visite cada cidade de uma determinada lista, exatamente uma vez, e retorne à cidade inicial (Guo; Hou; Ye, 2020; Liao; Yau; Chen, 2012; Kocyigit; Sahingoz; Diri, 2020; Nourmohammadzadeh; Sarhani; Voß, 2023; Tsai et al., 2004). Embora o PCV seja de fácil interpretação, sua resolução mostra-se consideravelmente difícil (Frischer; Pollak; Jančíková, 2019), sendo um dos problemas mais investigados na área da pesquisa operacional (Nourmohammadzadeh; Sarhani; Voß, 2023).

De acordo com Tsai et al. (2004), algoritmos evolucionários (AEs), são especialmente apropriados para resolver problemas de otimização difíceis, assim como o PCV, para os quais os métodos tradicionais de otimização são menos eficientes, sendo uma poderosa ferramenta para a resolução de problemas complexos (Costa; Vidal; André, 2003). Os AEs surgem como uma importante técnica de otimização e busca na última década, pois sua natureza flexível, torna-os um meio eficiente de resolução de problemas de otimização de alta complexidade (Guerrero; Suárez; Gudwin, 1999; Vikhar, 2016), uma vez que possibilita sua resolução em um tempo computacional hábil (Junior; Silva, 2015).

Os AEs são baseados no princípio da sobrevivência do mais apto, realizando uma evolução simulada para explorar potenciais soluções (Vikhar, 2016; Tsai et al., 2004). Com isso, eles trazem uma nova perspectiva para soluções de problemas e um aumento significativo em seu desempenho e eficiência. (Kocyigit; Sahingoz; Diri, 2020).

Diante do exposto, o presente estudo tem por objetivo, otimizar, a rota de entrega realizada por uma empresa fornecedora/lavadeira de uniformes profissionais sediada em uma cidade da região norte do Estado do Rio Grande do Sul. Para tanto, a situação problema foi modelada a partir da perspectiva do Problema do Caixeiro Viajante, o qual foi resolvido com a aplicação

de um Algoritmo Evolucionário, de modo a possibilitar os estabelecimentos de possíveis rotas de entrega que o transporte utilizado pela empresa visitasse todos os clientes e retornasse à sede da empresa e, ao mesmo tempo, demandassem o menor deslocamento possível;

Justifica-se a realização deste estudo, tendo-se em vista que a roteirização de veículos consiste em um dos desafios mais críticos enfrentados pelas empresas atualmente (Konstantakopoulos; Gayialis; Kechagias, 2022). Ochelska-Mierzejewska, Poniszewska-Marańda e Marańda (2021) evidenciam que, em áreas específicas de negócio, onde o transporte pode ser percebido como uma mais-valia ao produto, a sua otimização pode reduzir os custos em até 25% no total.

Desse modo, a utilização de rotas eficientes pode proporcionar uma vantagem competitiva direta às empresas, que tendem a operar com margens de lucratividade limitadas (Abbasi et al., 2020), uma vez que, o custo de entrega representa a maior parte de seus custos totais (Feng et al., 2021). Nesse sentido, otimizar a logística das organizações é de extrema importância para assegurar os níveis de serviço e equilibrar os custos (Garcia; Magalhães, 2021).

2. Revisão de Literatura

O Problema do Caixeiro Viajante é um problema de otimização combinatória classificado como *NP-hard*, amplamente utilizado devido à sua descrição simples (Agrawal et al., 2021; Hou; Ye, 2020; Tsai et al., 2004). Na literatura, o PCV aparece como o primeiro problema apresentado para o melhoramento das rotas veiculares (Junior; Silva, 2015). O PCV, foi definido por Dantzig, Fulkerson e Johnson (1954) como um problema de programação binário sobre um grafo $G = (N, A)$, conforme apresentado:

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

Sujeito a:

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

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

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset N \quad (3)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in N \quad (4)$$

Onde, de acordo com Taufer e Pereira (2011):

c_{ij} : Custo de ir da cidade i a cidade j ;

$x_{ij} = 1$: Se arco $(i,j) \in A$;

$x_{ij} = 0$: caso contrário;

S : Subgrafo de G ;

$|S|$: Números de vértices do subgrafo S .

Na definição de Dantzig, Fulkerson e Johnson (1954), a função objetivo busca minimizar a distância, ou o tempo necessário para que o “caixeiro viajante” percorra pontos distintos uma única vez e retorne ao ponto de partida inicial (Barbosa, 2014). Para garantir que nenhuma cidade seja visitada mais que uma vez, o modelo conta com uma restrição que possibilita que apenas um arco chegue a cada cidade j (1) e uma restrição que faz com que apenas um arco saia de uma cidade i (2) (Barbosa, 2014; Goldbarg, 2005; Taufer; Pereira, 2011). Para evitar a formação de circuitos pré-hamiltonianos, ou seja, subrotas, que acabariam por não possibilitar a solução ótima do modelo, limita-se o número de variáveis associadas a essas cidades que podem receber valor diferente de zero a $|S|-1$ (3) (Barbosa, 2014; Taufer; Pereira, 2011). Por fim, o modelo conta com uma restrição de não negatividade (4), de modo que os possíveis valores de x tornem-se binários (Taufer; Pereira, 2011).

Deste modo, o PCV tem como espaço de busca o conjunto de todas as permutações possíveis (Cunha, 2019). Embora o PCV seja de fácil descrição, sua resolução apresenta uma dificuldade considerável (Hoffman; Padberg; Rinaldi, 2013). A dificuldade de resolução do PCV está relacionada ao fato de que os algoritmos tradicionais utilizados para sua resolução apresentam limitações significativas (Frischer; Pollak; Jančíková, 2019).

Problemas de Otimização mais complexos, tal qual o PCV podem ser resolvidos com métodos metaheurísticos (Almeida et al., 2013; Barbosa, 2014). A principal característica dos métodos metaheurísticos é a sua capacidade de diversificar o campo de soluções, evitando um ótimo local (Barbosa, 2014), sendo aplicável a vários problemas de otimização com capacidade computacional limitada (Vikhar, 2016). Dentre os métodos metaheurísticos, os Algoritmos Evolucionários (AEs) são, segundo Tsai et al. (2004), especialmente apropriados para resolver

problemas de otimização difíceis, para os quais os métodos tradicionais de otimização são menos eficientes.

Os EAs são algoritmos de otimização metaheurística que trabalham com base no conceito de população (Al-Salami, 2009). Um EA é baseado em conceitos retirados da genética e da seleção natural, como reprodução, mutação, recombinação e seleção (Vikhar, 2016; Junior; Silva, 2015; Nunes, 2018; Tsai et al., 2004). Com isso, os EAs trazem uma nova perspectiva para soluções de problemas com abordagens de otimização, apresentando aumento significativo de desempenho e eficiência (Kocyigit; Sahingoz; Diri, 2020). Embora este método nem sempre encontre a solução ótima, ele será capaz de encontrar soluções satisfatórias com frequência (Nunes, 2018), sendo, segundo Němec et al. (2021), um meio eficiente de resolução para problemas de otimização complexos, para os quais soluções heurísticas não estão disponíveis ou tendem a não gerar resultados satisfatórios (Al-Salami, 2009).

De modo geral, os AEs são técnicas de busca aleatória-guiada que buscam inspiração na evolução natural, implementando modelos computacionais dos procedimentos executados pela natureza na resolução de problemas (Linden, 2012). Desse modo, o AE faz regularmente alterações ou mutações aleatórias em um ou mais membros da população atual, resultando em uma nova solução candidata (que pode ser melhor ou pior do que os membros existentes da população) (Němec et al., 2021).

Nesse viés, as partes condicionadas à evolução são as soluções sensivelmente eficientes para um determinado problema, pertencendo a um espaço de busca do problema de otimização (Dréo et al., 2006; Němec et al., 2021). A população utilizada no problema é condicionada a sucessivas iterações que leva sempre em conta a qualidade das soluções alcançadas (Dréo et al., 2006). Desse modo, o bom funcionamento de AE está diretamente relacionado à escolha dos parâmetros (Nunes, 2018).

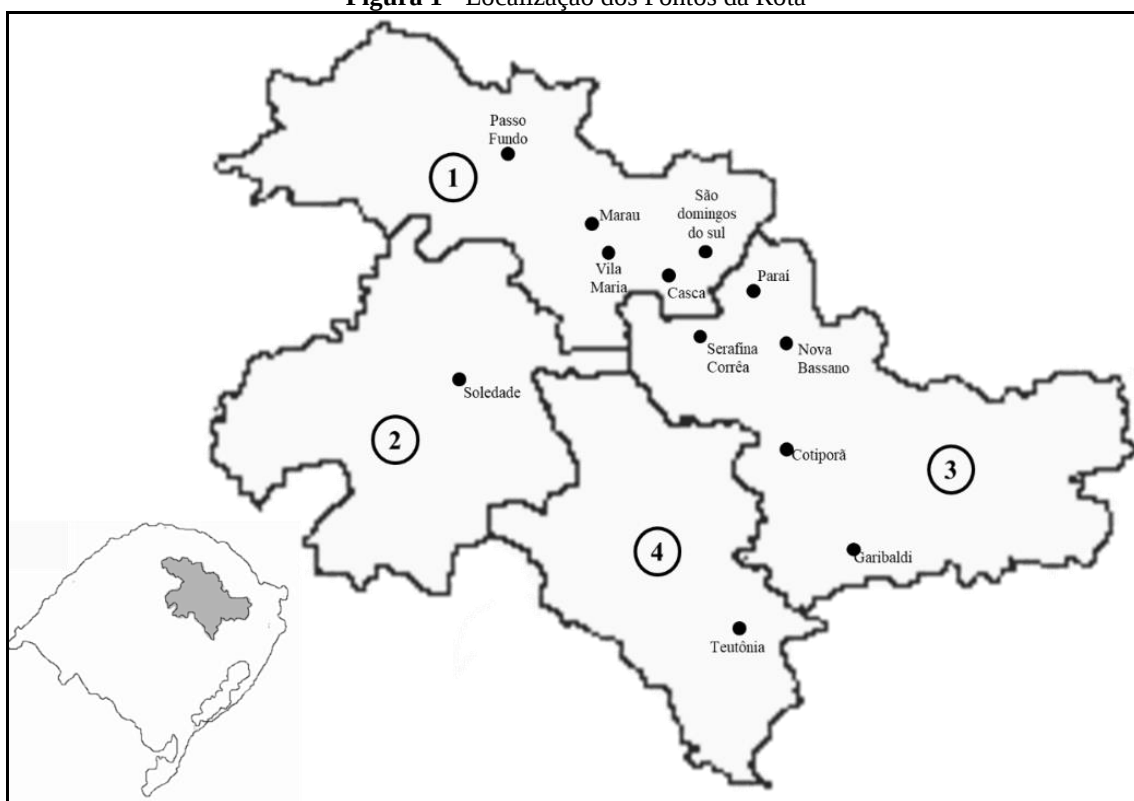
Dentre os parâmetros, destaca-se a taxa de mutação, a qual determina a probabilidade com que uma mutação ocorrerá (Catarina; Bach, 2003). A taxa de mutação não deve ser alta pois pode impedir que a população convirja para uma solução ótima específica, tornando a busca essencialmente aleatória (Kocyigit; Sahingoz; Diri, 2020; Catarina e Bach, 2003). Catarina e Bach (2003), recomendam o uso de uma taxa de mutação entre 0,5% e 5%, pois uma taxa superior a 5% pode tornar a busca aleatória, uma vez que taxas de mutação mais baixas

previnam que uma dada solução fique estagnada em um valor, causando uma convergência prematura, além de possibilitar que se chegue em qualquer ponto do espaço de busca.

3. Método

Para alcançar o objetivo, proposto neste estudo, realizou-se uma coleta de dados a fim de mapear as cidades nas quais a empresa estudada realiza entregas, bem como as distâncias existentes entre a empresa e cada um de seus clientes. A Figura 1 apresenta a localização da empresa (Casca - RS) e das cidades que devem receber suas entregas, as quais estão situadas em quatro regiões distintas do Estado do Rio Grande do Sul, utilizando-se como parâmetro a divisão regional estabelecida pelo Conselhos Regionais de Desenvolvimento do Rio Grande do Sul (COREDE-RS).

Figura 1 - Localização dos Pontos da Rota



Regiões: (1) Região COREDE Produção; (2) Região COREDE Alto da Serra do Botucarái; (3) Região COREDE Serra; e (4) Região COREDE Vale do Taquari.

Fonte: Dados da Pesquisa (2024)

Para a obtenção dos resultados utilizou-se o método evolutivo disponível no complemento Solver, o qual utiliza algoritmos evolucionários para encontrar “boas” soluções para problemas de otimização, sendo um método não determinístico que pode fornecer diferentes

soluções em diferentes execuções (Němec et al., 2021). Todos os cálculos foram realizados utilizando um computador com sistema operacional Windows 11, processador AMD Ryzen 7 5800H e 8 GB de memória RAM (utilizável: 7,36 GB), utilizando-se o software Excel do pacote Office Professional Plus 2016.

Tendo-se em vista o impacto da taxa de mutação destacado por Kocyigit, Sahingoz e Diri (2020) e Catarina e Bach (2003), os cálculos foram realizados utilizando valores de taxa de mutação entre 0,5% e 5%. Os valores da taxa de mutação foram variados em intervalos de 0,5%, a fim de testar os impactos das diferentes taxas de mutação no cálculo da rota de entrega otimizada. Os demais parâmetros do modelo foram mantidos de acordo com o padrão do software, a saber: (i) convergência = 0,0001; (ii) Tamanho da População = 100; (iii) propagação aleatória = 0; e (iv) Tempo Máximo sem aperfeiçoamento = 30.

4. Resultados

Para a realização do cálculo da rota mais curta através do Algoritmo Evolucionário, foi elaborada uma matriz que apresenta as distâncias necessárias para interligar cada um dos pontos da rota aos demais, de modo a quantificar cada uma das possíveis rotas que podem ser realizadas pela empresa (Quadro 1). Como a rota em estudo conta com um total de 12 cidades, situadas em quatro regiões diferentes do estado do Rio Grande do Sul e os dados referentes às distâncias entre as mesmas são simétricos, é possível realizar $\frac{(12-1)!}{2}$ rotas diferentes, ou seja, existem 19.958.400 possibilidades de rotas que podem ser utilizadas pela empresa para a realização das entregas.

Quadro 1 - Distâncias entre Cidades

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,0	31,7	64,7	19,6	122,0	131,0	19,1	103,0	76,0	36,9	12,1	24,0
2		0,0	32,3	54,1	153,0	162,0	12,7	80,8	108,0	68,5	43,6	55,7
3			0,0	85,5	188,0	199,0	41,7	76,3	142,0	103,0	76,7	90,0
4				0,0	102,0	112,0	38,5	83,8	57,1	51,5	29,5	38,7
5					0,0	46,1	141,0	166,0	44,9	85,8	122,0	107,0
6						0,0	150,0	128,0	91,0	132,0	141,0	150,0
7							0,0	86,4	94,9	55,8	30,9	42,9
8								0,0	122,0	139,0	114,0	126,0
9									0,0	52,1	85,9	73,7
10										0,0	43,3	28,3
11											0,0	15,0
12												0,0

Cidades: (1) Casca (Origem); (2) Marau; (3) Passo Fundo; (4) Serafina Corrêa; (5) Garibaldi; (6) Teutônia; (7) Vila Maria; (8) Soledade; (9) Cotiporã; (10) Nova Bassano; (11) São Domingos do Sul; e (12) Paraí.

Fonte: Dados da Pesquisa (2024)

Uma vez levantados os dados referentes as distâncias entre cada um dos pontos que devem receber entregas da empresa em estudo, realizaram-se os cálculos para a otimização da rota de entregas da empresa. Os cálculos foram realizados variando a taxa de mutação em intervalos de 0,5%. A taxa de mutação foi variada em um intervalo de 0,5% a 5%, conforme definido por Catarina e Bach (2003). O Quadro 2 apresenta os resultados obtidos com cada um dos valores atribuídos ao parâmetro de taxa de mutação da rotina utilizada para o cálculo.

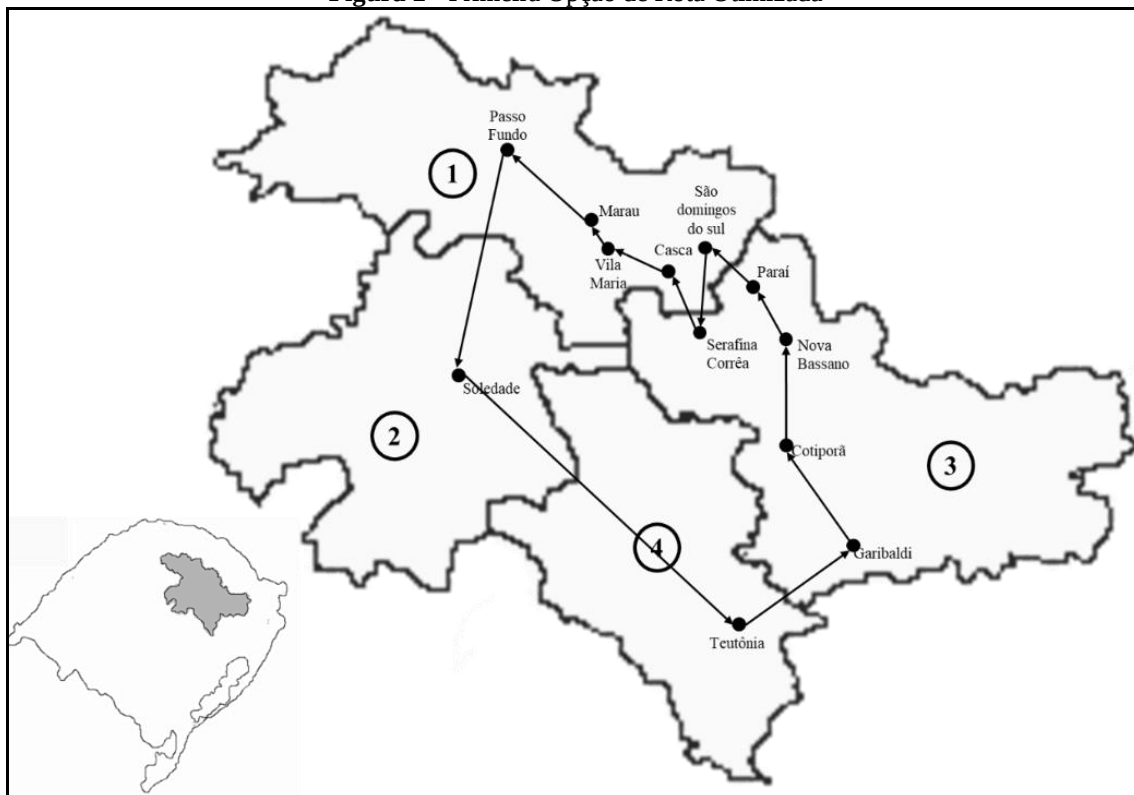
Quadro 2 - Resultados Obtidos

Taxa de Mutação	Distância Total da Rota	Rota
0,5%	503,9 km	1-7-2-3-8-6-5-9-10-12-11-4-1
1,0%	503,9 km	1-7-2-3-8-6-5-9-10-12-11-4-1
1,5%	503,9 km	1-4-11-12-10-9-5-6-8-3-2-7-1
2,0%	503,9 km	1-7-2-3-8-6-5-9-10-12-11-4-1
2,5%	503,9 km	1-7-2-3-8-6-5-9-10-12-11-4-1
3,0%	503,9 km	1-7-2-3-8-6-5-9-10-12-11-4-1
3,5%	503,9 km	1-4-11-12-10-9-5-6-8-3-2-7-1
4,0%	503,9 km	1-7-2-3-8-6-5-9-10-12-11-4-1
4,5%	503,9 km	1-7-2-3-8-6-5-9-10-12-11-4-1
5,0%	503,9 km	1-4-11-12-10-9-5-6-8-3-2-7-1

Fonte: Dados da Pesquisa (2024)

A partir dos resultados obtidos com os cálculos, observou-se que a variação da taxa de mutação não gerou impactos na distância mínima necessária para a realização de todas as entregas, visto que todas as taxas de mutação testadas convergiram para um mesmo ótimo local, gerando rotas com um total de 503,9 km. Todavia, embora a variação da taxa de mutação não tenha gerado variação na distância percorrida, a mesma possibilitou que fossem encontradas duas possibilidades de rotas que demandam o mesmo deslocamento para a sua conclusão.

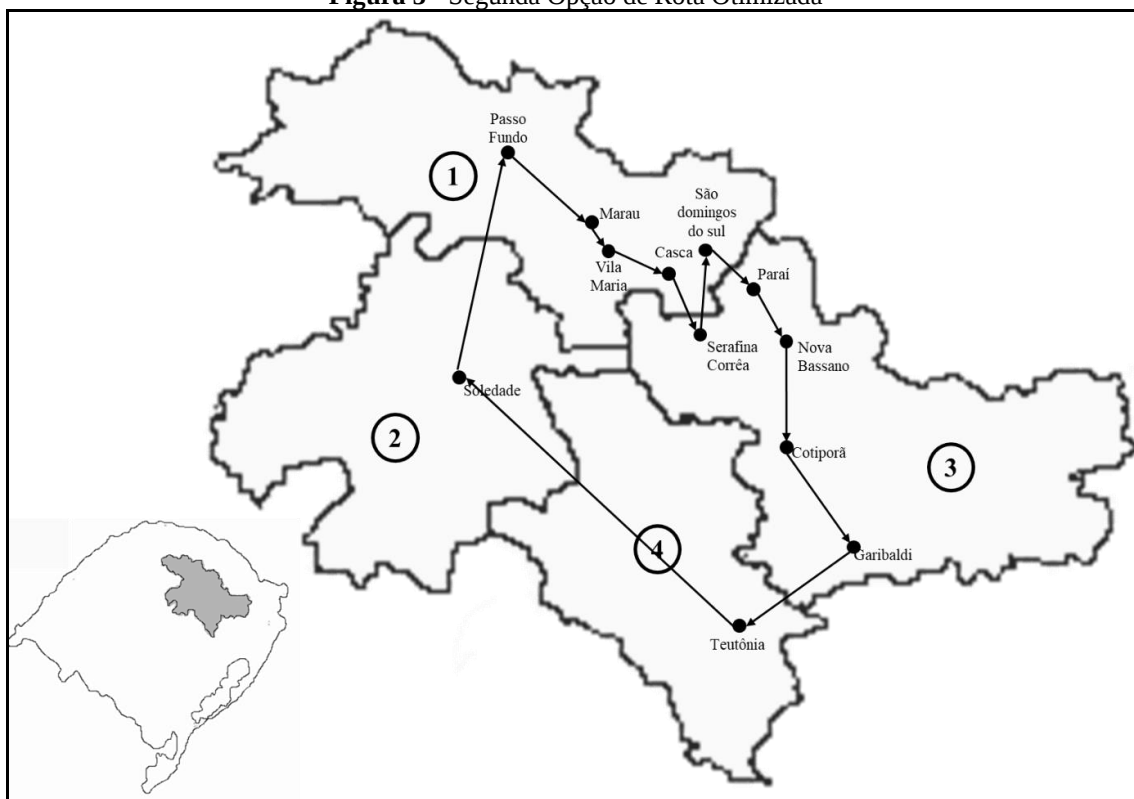
A primeira rota tem início na cidade de Casca, seguindo para Vila Maria, Marau, Passo Fundo, Soledade, Teutônia, Garibaldi, Cotiporã, Nova Bassano, Paraí, São Domingos do Sul, terminando em Serafina Corrêa, retornando posteriormente a cidade de Origem (Casca). A disposição das cidades e o trajeto da primeira opção de rota são apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Primeira Opção de Rota Otimizada


Regiões: (1) Região COREDE Produção; (2) Região COREDE Alto da Serra do Botucaraí; (3) Região COREDE Serra; e (4) Região COREDE Vale do Taquari.

Fonte: Dados da Pesquisa (2024)

Por sua vez, a segunda opção foi obtida pelo fato de o problema estudado ser um problema simétrico, de modo que esta consiste apenas na inversão do sentido da primeira opção de rota. Todavia, ainda é uma opção de rota que pode ser explorada pela empresa em estudo. Deste modo, a segunda rota, assim como a primeira, tem início na sede da empresa situada na cidade de Casca, seguindo para Serafina Corrêa, São Domingos do Sul, Parai, Nova Bassano, Cotiporã, Garibaldi, Teutônia, Soledade, Passo Fundo, Marau, sendo finalizada na cidade de Vila Maria, onde ocorre o retorno para a cidade de Origem (Casca). A disposição das cidades e o trajeto da segunda opção de rota são apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Segunda Opção de Rota Otimizada


Regiões: (1) Região COREDE Produção; (2) Região COREDE Alto da Serra do Botucará; (3) Região COREDE Serra; e (4) Região COREDE Vale do Taquari.

Fonte: Dados da Pesquisa (2024)

5. Considerações Finais

O presente estudo buscou otimizar, a partir da modelagem da situação problema pela perspectiva do Problema do Caixeiro Viajante, a rota de entrega realizada por uma empresa fornecedora/lavadeira de uniformes profissionais sediada em uma cidade da região norte do Estado do Rio Grande do Sul. A otimização da rota foi realizada com a aplicação de um Algoritmo Evolucionário e os resultados obtidos possibilitaram encontrar uma rota viável para a empresa em estudo, possibilitando a realização de todas as entregas com o menor deslocamento possível.

Os resultados obtidos com este estudo, possibilitam demonstrar que a utilização de Algoritmos Evolucionários para resolução de problemas complexos como o Problema do Problema do Caixeiro Viajante, gera soluções, que por mais que possam não ser necessariamente a solução ótima, ainda são soluções viáveis. Conforme os resultados obtidos com este estudo, foi possível estabelecer, por meio de um Algoritmo Evolucionário, uma rota de entrega executável e adequada para a empresa estudada.

Embora não tenham sido mensurados, a nova rota estabelecida pode gerar benefícios relacionados ao custo operacional, velocidade e eficiência de todo o transporte logístico da empresa, proporcionando-lhe uma vantagem competitiva. Diante disso, estudos futuros podem explorar o impacto da aplicação de rotas otimizadas através de AEs nos resultados e na competitividade das organizações.

Por fim, no que tange ao cálculo das rotas, cabe destacar que, por mais que tenham sido realizadas variações no parâmetro de taxa de mutação durante o desenvolvimento dos cálculos referentes as rotas, não foram constatadas variações dos resultados encontrados. Uma possibilidade que, por ser utilizada um número reduzido de pontos de entrega, os resultados convergiram para um mesmo ponto, independentemente da taxa de mutação utilizada. Deste modo, estudos futuros podem testar os efeitos da taxa de mutação em situações problema com um maior número de pontos de entrega.

REFERÊNCIAS

ABBASI, Mahdi.; RAFIEE, Milad.; KHOSRAVI, Mohammad R.; JOLFAEI, Alireza.; MENON, Varun G. and KOUSHYAR, Javad Mokhtari. **An efficient parallel genetic algorithm solution for vehicle routing problem in cloud implementation of the intelligent transportation systems**. Journal of Cloud Computing. 2020, vol.9, n.1.

AGRAWAL, Anubha; GHUNE, Nitish; PRAKASH, Shiv and RAMTEKE, Manojkumar. **Evolutionary algorithm hybridized with local search and intelligent seeding for solving multi-objective Euclidian TSP**. Expert Systems with Applications. 2021, 115192.

ALMEIDA, Francisco; GIMÉNEZ, Domingo; LÓPEZ-ESPÍN, Jose Juan and PÉREZ-PÉREZ, Melquíades. **Parameterized Schemes of Metaheuristics: Basic Ideas and Applications with Genetic Algorithms, Scatter Search, and GRASP**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2013, vol.43, n.3, pp. 570–586.

AL-SALAMI, Nada M.A. **Evolutionary Algorithm Definition**. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2009, vol.2, issue 4, pp. 789–795.

BARBOSA, Roberto Cavalcante. **Aplicação da Metaheurística Algoritmo Genético na Otimização das Rotas de Entregas da Distribuição Física de Produtos no Município de Fortaleza**. Fortaleza, Ceará, 2014.

BREMENKAMP, Leonardo Helmer; MONTEIRO, Nathalia Juca; REPOLHO, Hugo Miguel Varela; CUNHA, Victor Abu Marrul Carneiro and DANTAS, Leila Figueiredo. **Aplicação da heurística de clarke & wright para um problema de roteirização de veículos homogêneos em uma distribuidora xxxvi encontro nacional de engenharia de produção**. XXVI encontro Nacional de Engenharia De Produção. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2016, pp. 107-120.

CATARINA Adair Santa; BACH, Sirlei Lourdes. **Estudo do efeito dos parâmetros genéticos na solução otimizada e no tempo de convergência em algoritmos genéticos com codificações binária e real**. Acta Scientiarum: Technology, 2003, vol. 25, n. 2, p. 147-152



CHEN, Jing; GUI, Pengfei; DING, Tao; NA, Sanggyun and ZHOU, Yingtang. **Optimization of Transportation Routing Problem for Fresh Food by Improved Ant Colony Algorithm Based on Tabu Search**. Sustainability, 2019, vol.11, issue 23, 6584.

COSTA, FV; VIDAL, FS and ANDRÉ, C. M. G. **SLAG-Resolvendo o problema do caixeiro viajante usando Algoritmos Genéticos**, Anais do V Encontro de Estudantes de Informática do Tocantins. Palmas, TO, 2003. pp. 149-156.

DANTZIG, G.; FULKERSON, R. and JOHNSON, S. **Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem**. Journal of the Operations Research Society of America, 1954, vol.2, issue 4, pp. 393–410.

DRÉO, Johann; PÉTROWSKI, Alain; SIARRY, Patrick and TAILLARD, Eric. **Metaheuristics for Hard Optimization**. 2006, Berlin: Springer-Verlagpp. 75-122.

FENG, Liang; ZHOU, Lei; GUPTA, Abhishek; ZHONG, Jinghui; ZHU, Zexuan; TAN, Kay-Chen; QIN, Kai. **Solving Generalized Vehicle Routing Problem with Occasional Drivers via Evolutionary Multitasking**. IEEE Transactions on Cybernetics. 2021, vol.51, n.6, pp. 3171–3184.

FRISCHER, Robert; POLLAK, Miloš and JANČÍKOVÁ, Zora Košťálová. **Optimizing logistics routes in the field of maintenance**. Acta logistica. 2019, vol.6, issue 3, pp. 93-101.

GARCIA, Nathalia Souza Carvalho and MAGALHÃES, Victor Hugo Prates. **Desenvolvimento de um Sistema de Roteirização de Veículos Baseado em uma Meta-Heurística de Algoritmo Genético: Um caso Envolvendo Frotas Heterogêneas e Janelas de Tempo**. Ituiutaba, Minas Gerais, 2021.

GARCÍA-ARCA, Jesús; GARRIDO, Alicia Trinidad González-Portela and PRADO-PRADO, José Carlos. **“Packaging Logistics” for improving performance in supply chains: the role of meta-standards implementation**. Production, 2016, vol.26, issue 2 pp. 261–272.

GOLDBARG, Marco Cesar. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2º ed., 2005, Rio de Janeiro: Elsevier.

GUERRERO, José Antonio Sánchez; SUÁREZ, Lizet Liñero and GUDWIN, Ricardo Ribeiro. **Análise da Importância de Parâmetros em um Algoritmo Genético por meio de sua Aplicação no Aprendizado de uma Rede Neural**. Anais do II ENIA, 1999, vol.9.

GUO, Ping; HOU, Mengliang and YE, Lian. **MEATSP: A Membrane Evolutionary Algorithm for Solving TSP**. IEEE Access. 2020, vol.8, pp. 99081-199096.

HOFFMAN, Karla L.; MANFRED Padberg, and GIOVANNI Rinaldi. **Traveling salesman problem**. Encyclopedia of operations research and management science, 2013, vol.1, pp. 1573–1578.

JUNIOR, Joel David Costa and SILVA, Alysson Alexandre Naves. **Algoritmo Genético aplicado ao problema de Roteamento de Veículos**. DESIGN & TECNOLOGIA: Revista Tecnológica e Científica, 2015, vol. 2, n. 2, pp. 88-109.

KOCYIGIT, Emre; SAHINGOZ, Ozgur Koray and DIRI, Banu. **An Evolutionary Approach to Multiple Traveling Salesman Problem for Efficient Distribution of Pharmaceutical Products**. 2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE). Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1-7.

KONSTANTAKOPOULOS, Grigorios D.; GAYIALIS, Sotiris P. and KECHAGIAS, Evripidis P. **Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: a literature review and classification**. Operational Research, 2022, vol.22, n.3, pp. 2033–2062.

LIAO, Yen-Far; YAU, Dun-Han and CHEN, Chieh Li. **Evolutionary algorithm to traveling salesman problems**. Computers & Mathematics with Applications. 2012, vol.64, pp. 788-797.

MELO, André Cristiano da Silva and FERREIRA FILHO, Virgílio José Martins. **Sistemas de roteirização e programação de veículos**. Pesquisa Operacional, 2001, vol.21, n.2, pp. 223–232.



MIRANDA, Anderson Louzada; SOLIANI, Rodrigo Duarte and FREITAS, César Gomes. **Roteirização de Veículos: Uma Aplicação do Problema do Caixeiro Viajante no Setor de Alimentos.** XLI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, 2021.

NĚMEC, Petr; STODOLA, Petr; PECINA, Miroslav; NEUBAUER, Jiří and BLAHA, Martin. **Optimization of the Weighted Multi-Facility Location Problem Using MS Excel.** Algorithms, 2021, vol.14, issue 7.

NOURMOHAMMADZADEH, Abtin; SARHANI, Malek and VOß, Stefan. **A matheuristic approach for the family traveling salesman problem.** Journal of Heuristics, 2023, vol.29, pp. 435–460.

NUNES, Jancleiton Rodrigues de Oliveira. **Avaliação de Taxas de Cruzamento e Mutação em um Algoritmo Genético Baseado em Ordem Aplicado ao Problema do Caixeiro Viajante.** Caicó, Rio Grande do Norte, 2018.

OCHESKA-MIERZEJEWSKA, Joanna; PONISZEWSKA-MARAÑDA, Aneta and MARAÑDA, Witold. **Selected genetic algorithms for vehicle routing problem solving.** Electronics (Switzerland), 2021, vol.10, n.24.

OUYANG, Fei. **Research on Port Logistics Distribution Route Planning Based on Artificial Fish Swarm Algorithm.** Journal of Coastal Research, 2020, vol.115, pp. 78–80.

PALHARES, R. A. and ARAÚJO, M. C. B. **Vehicle Routing: Application of Travelling Salesman Problem in a Dairy.** 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Bangkok, Thailand, 2018, pp. 1421-1425.

STOLK, Jacob; MANN, Isaac; MOHAIS, Arvind and MICHALEWICZ, Zbigniew. **Combining Vehicle Routing and Packing for Optimal Delivery Schedules of Water Tanks.** OR Insight, 2013, vol.26, n.6, pp. 167–190.

TAUFER, Fernando Soares Gomes and PEREIRA, Elaine Correa. **Aplicação do problema do caixeiro viajante na otimização de roteiros,** Anais do XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte, MG, 2011.

TSAL, Huai-Kuang; YANG, Jinn-Moon; TSAI, Yuan-Fang and KAO, Cheng-Yan. **An Evolutionary Algorithm for Large Traveling Salesman Problems.** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 2004, vol.34, n.4, pp. 1718-1729.

VIKHAR, Pradnya A. **Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects.** 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC), Jalgaon, India, 2016, pp. 261-265.