



EVENTO
ON-LINE



estga
universidade
de aveiro

ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Eficiência logística no Sertão Central: estratégias de otimização de rotas para reduzir custos na distribuição de rações com o Problema do Caixeiro Viajante

Kauan Diêgo Noronha de Lima

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Quixadá

Leônidas Pinheiro Nunes

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Quixadá

José Francisco de Oliveira Neto

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Quixadá

José Davi Pereira Matias

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Quixadá

Maria Alany Medeiros de Almeida

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Quixadá

Resumo: Este estudo investiga a logística de distribuição de rações para animais, um elemento vital da agropecuária brasileira, que movimentam bilhões anualmente. O trabalho identifica desafios enfrentados por uma empresa do setor, como as condições inadequadas de transporte e o planejamento ineficaz das rotas, os quais afetam os custos operacionais e os prazos de entrega. Para abordar essas questões, a pesquisa recorre à otimização de rotas, utilizando o Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Um modelo matemático foi desenvolvido para determinar a rota mais eficiente para um veículo que precisa visitar diversos pontos de entrega, com o objetivo de reduzir distâncias e custos. A metodologia inclui a modelagem matemática, definição de variáveis de decisão e a aplicação de técnicas de programação matemática, com suporte do *software* CPLEX®. Os resultados demonstram que a adoção de rotas otimizadas pode reduzir em 2,8 km a distância total percorrida, resultando em menores custos operacionais e no consumo de combustível. Além disso, essa otimização favorece a sustentabilidade ao diminuir as emissões de gases de efeito estufa. Entretanto, o artigo ressalta que a implementação prática dessas soluções pode enfrentar desafios, como variações nas condições de tráfego e estradas. Em conclusão, a pesquisa evidencia que a utilização de técnicas de programação linear e métodos quantitativos pode promover melhorias contínuas no setor logístico, aumentando a competitividade e incentivando práticas sustentáveis na distribuição de rações para animais.

Palavras-chave: Otimização de rotas, logística, modelagem matemática.

Logistics Efficiency in the Sertão Central: Route Optimization Strategies to Reduce Feed Distribution Costs Using the Traveling Salesman Problem

Abstract: This study investigates the logistics of animal feed distribution, a vital element of Brazilian agriculture that generates billions annually. The work identifies challenges faced by a company in the sector, such as inadequate transportation conditions and ineffective route planning, which affect operational costs and delivery times. To address these issues, the research employs route optimization, utilizing the Traveling Salesman Problem (TSP). A mathematical model was developed to determine the most efficient route for a vehicle that needs to visit various delivery points, aiming to reduce distances and costs. The methodology includes mathematical modeling, decision variable definition, and the application of mathematical programming techniques, supported by CPLEX® software. The results demonstrate that adopting optimized routes can reduce the total distance traveled by 2.8 km, resulting in lower operational costs and fuel consumption. Furthermore, this optimization promotes sustainability by decreasing greenhouse gas emissions. However, the article emphasizes that the practical implementation of these solutions may encounter challenges, such as variations in traffic conditions and road quality. In conclusion, the research highlights that the use of linear programming techniques and quantitative methods can foster continuous improvements in the logistics sector, enhancing competitiveness and encouraging sustainable practices in animal feed distribution.

Keywords: Route optimization, logistics, mathematical modeling.

1. Introdução

O setor de rações e suplementos minerais no Brasil teve um desempenho notável em 2023, atingindo uma produção de 83,6 milhões de toneladas, o que representa um crescimento de 1% em comparação ao ano anterior (SINDIRAÇÕES, 2023). As rações destinadas à suinocultura e à avicultura destacaram-se com aumentos de 1,2% e 2,1%, respectivamente (ABPA, 2023). No entanto, apesar das dificuldades enfrentadas pela pecuária leiteira, que registrou uma queda de 67% na margem bruta (CEPEA USP, 2023), a suinocultura obteve recordes de exportação. A avicultura, por sua vez, está projetando um aumento de 3% na demanda externa, reafirmando a importância estratégica do setor para a economia nacional (ABPA, 2023).

Entretanto, a distribuição de rações enfrenta desafios importantes, especialmente em relação à eficiência das rotas utilizadas. A principal questão identificada é a ineficiência das rotas atuais, que, sem uma análise matemática adequada, gera distâncias desnecessárias e altos custos operacionais. Essas ineficiências estão relacionadas às condições das estradas rurais e à localização dos pontos de entrega, que muitas vezes são de difícil acesso, resultando em atrasos e oneração das operações.

Para enfrentar esse problema, a pesquisa operacional, especialmente a otimização de rotas, surge como uma ferramenta essencial. A aplicação de técnicas analíticas permite a tomada de decisões mais eficazes, como a roteirização de veículos, que maximizam a utilização dos recursos disponíveis e minimizam os custos (DANTZIG; RAMSER, 1959; TOTH; VIGO, 2014). Uma abordagem clássica nesse campo é o problema do caixeiro viajante (PCV), que envolve uma determinação de rota mais curta para que um veículo visite um conjunto de locais uma única vez e retorne ao ponto inicial (ARENALLES *et al.*, 2015). Essa metodologia é particularmente relevante para uma distribuidora de rações localizada no Sertão Central, que enfrenta desafios logísticos devido à geografia da região.

O objetivo deste artigo é apresentar uma solução de roteirização baseada no PCV, aplicada especificamente às rotas de uma empresa de pequeno porte. A proposta visa demonstrar como essa metodologia pode não apenas reduzir os custos operacionais, mas também melhorar a logística de distribuição, proporcionando uma operação mais eficiente e ágil. A metodologia aplicada envolveu a modelagem matemática das rotas para identificar o caminho de menor distância, atendendo às necessidades específicas da empresa (SAMPIERI *et al.*, 2013).

2. Referencial Teórico

2.1 Pesquisa Operacional e Programação Linear Inteira

A pesquisa operacional (PO) começou a tomar forma durante a Segunda Guerra Mundial, onde um conjunto de cientistas de diversas áreas uniu forças para enfrentar desafios militares complexos, buscando soluções estratégicas e táticas inovadoras (SILVA, *et al.* 2017). Segundo Arenales *et al.* (2015), a PO tem como propósito fundamental oferecer uma estrutura matemática que permite modelar e analisar sistemas complexos, facilitando a tomada de decisões de maneira eficiente e eficaz. Para isso, essa área faz uso de modelos matemáticos, técnicas quantitativas e ferramentas computacionais para solucionar problemas em diversos setores, como produção, logística, finanças e marketing (PINTO, 2001).

A programação linear (PL) é uma técnica de otimização utilizada na pesquisa operacional, cujo objetivo é maximizar ou minimizar funções em cenários reais que envolvem múltiplas variáveis e restrições (PRADO, 2016). Essencialmente, a PL se aplica a modelos matemáticos de comportamento linear, onde tanto a função objetivo quanto as restrições são expressas por meio de funções lineares (TAHA, 2008). Na programação linear inteira (PLI), as variáveis de decisão são exclusivamente números inteiros, onde é adicionado uma camada de complexidade e realismo ao modelo matemático, garantindo soluções mais precisas e aplicáveis a problemas do mundo real (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

2.2 Modelagem matemática

A modelagem matemática consiste em uma série de passos usados para traduzir uma situação real em termos matemáticos utilizando-se de todos os dados coletados na fase de definição do problema para buscar a solução mais eficiente possível (LONGARAY, 2013). Um modelo matemático traduz problemas do mundo real para o universo das equações, inequações e símbolos matemáticos (ARENALES *et al.*, 2015). No caso da programação linear, o modelo deve ter uma função objetivo linear que define o resultado desejado da decisão, seja ele maximizar algo, como receitas, ou minimizar, como custos (SILVA *et al.*, 2017).

Conforme Hillier e Lieberman (2013), um modelo matemático é composto por vários elementos essenciais:

- Variáveis de decisão: representadas por n decisões que devem ser estimadas e executadas ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), cujos valores precisam ser determinados;
- Função objetivo: simbolizando a medida de desempenho apropriada em conjunto com as variáveis de decisão;
- Restrições são as limitações matemáticas, geralmente expressas por desigualdades, aplicadas às variáveis de decisão;
- Parâmetros são as constantes usadas tanto nas restrições quanto na função objetivo.

2.3 Problema do Caixeiro Viajante

Segundo Hillier e Lieberman (2013), o problema do caixeiro viajante (PCV) é um modelo matemático clássico que ganhou destaque oficialmente na década de 1930. Os mesmos autores ainda afirmam que seu objetivo principal é determinar a rota mais curta para que um caixeiro viajante consiga visitar todos os pontos de coleta de maneira eficiente e otimizada. De acordo com Arenales *et al.* (2015), o PCV é uma ferramenta eficaz para resolver questões de determinação de rotas, focando em minimizar os custos por meio da otimização das distâncias percorridas. Esse problema pode ser dividido em duas categorias: simétricos (quando para todos os pares de nós $\{i, j\}$, os custos são iguais em

ambas as direções) e assimétricos (o número de variáveis envolvidas é o dobro em comparação com o caso simétrico) (ARENALES *et al.*, 2015).

2.4 Heurísticas do PCV Simétrico

2.4.1 Heurística gulosa

De acordo com Hillier e Lieberman (2013), a heurística gulosa é uma técnica de PO voltada a encontrar a solução ótima para um problema específico. A base dessa técnica reside na ideia de que, ao fazer escolhas locais ótimas, atinge-se a solução global ideal (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Como explicado por Taha (2008), a heurística gulosa seleciona sempre a melhor opção disponível em cada etapa do processo. Esse método funciona sob o princípio de tomar decisões imediatas sem se preocupar com as consequências futuras (TAHA, 2008). O processo é iterativo, sempre optando pela alternativa mais vantajosa naquele instante (ARENALES *et al.*, 2015). Essa abordagem é repetida até que a solução ótima seja alcançada (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). A heurística gulosa se mostra particularmente útil quando há muitas opções a serem consideradas e o tempo para avaliá-las é limitado (ARENALES *et al.*, 2015).

2.4.2 Heurística do vizinho mais próximo

O método heurístico conhecido como Vizinho Mais Próximo é uma abordagem intuitiva que define a rota a partir das distâncias entre as cidades, selecionando sempre a cidade mais próxima, ou seja, a que possui a menor distância (MORO *et al.*, 2018). De acordo com Goldberg e Luna (2005), a cada iteração, uma nova cidade é incluída na rota a partir da cidade de origem, considerando-se a menor distância em relação ao último ponto visitado. Os mesmos autores ainda salientam que esse processo continua até que todos os locais tenham sido visitados, conectando ponto a ponto cada cidade até o ponto inicial.

3. Metodologia

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa quantitativa, pois envolve variáveis que podem ser medidas e analisadas numericamente (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018; MARTINS, 2018). O objetivo principal é minimizar a distância percorrida em uma rota, reduzindo o percurso total. Para atingir esse objetivo, foi utilizada a metodologia de estudo de caso, uma abordagem que possibilita uma visão abrangente do problema e facilita a compreensão de eventos reais (GIL, 2017).

A estrutura da pesquisa segue as etapas de um estudo de Pesquisa Operacional descritas por Taha (2008), começando pela investigação de um problema real e sua modelagem matemática. O processo desenvolve-se nas etapas de definição do problema, construção do modelo e solução do modelo, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Etapas de um estudo de pesquisa operacional



Fonte: Adaptado de Taha (2008)

A etapa inicial exigiu um entendimento detalhado do problema e a coleta de dados relevantes. No contexto deste projeto, foram identificados os desafios de roteirização enfrentados pela empresa, além de coletadas informações detalhadas sobre as rotas atualmente realizadas e os pontos de entrega. Foram mapeados os onze clientes específicos para os quais a rota precisa ser otimizada. Informações como as localizações geográficas dos clientes e as distâncias entre os pontos foram reunidas, criando uma base sólida para a análise e para a formulação matemática.

O modelo matemático foi desenvolvido para representar o problema de roteirização utilizando o Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Esse modelo visa minimizar a distância total que um veículo deve percorrer para visitar cada um dos onze clientes exatamente uma vez e retornar ao ponto de partida. A formulação incluiu a definição de variáveis, a função objetivo e as restrições do problema. A função objetivo foi projetada para minimizar a soma das distâncias entre os pontos de entrega, enquanto as restrições garantem que cada ponto seja visitado uma única vez.

Na fase de solução, técnicas de programação matemática foram aplicadas ao modelo por meio do *software* CPLEX®, específico para resolver o PCV. A utilização do *software* de otimização permitiu resolver o problema e identificar a rota que minimiza a distância total percorrida. Os resultados foram então analisados para verificar a eficiência da nova rota em comparação com a rota atualmente utilizada pela empresa. Também foram utilizadas as heurística gulosa e vizinho mais próximo como forma de validar a solução ótima encontrada.

4. Resultados e discussão

4.1 A empresa e seu problema

A organização analisada neste estudo é uma empresa especializada na compra e revenda de rações para animais, que enfrenta desafios significativos relacionados à otimização de suas rotas de entrega. A eficiência dessas rotas influencia diretamente os custos operacionais e a qualidade do serviço oferecido aos clientes. Atualmente, o planejamento das rotas de entrega é feito sem o suporte de análises matemáticas detalhadas, o que pode resultar em trajetos mais longos e, conseqüentemente, em custos adicionais.

O projeto enfoca a otimização de uma rota específica realizada por um caminhão Mercedes-Benz MB 710 Carga Seca 3/4 4x2, destinada ao atendimento de onze clientes. A abordagem adotada é baseada no Problema do Caixeiro Viajante Simétrico, com o objetivo de identificar a rota mais curta que permita ao veículo visitar todos os pontos de entrega e retornar ao ponto de origem, minimizando a quilometragem percorrida. O escopo do estudo visa fornecer uma solução matemática que contribua para a redução dos custos de transporte e para o aprimoramento da eficiência operacional, beneficiando tanto a logística interna quanto a qualidade do serviço ao cliente. Deste modo, a tabela 1 apresenta todos os pontos de entrega e todas as distâncias entre si e o ponto de partida.

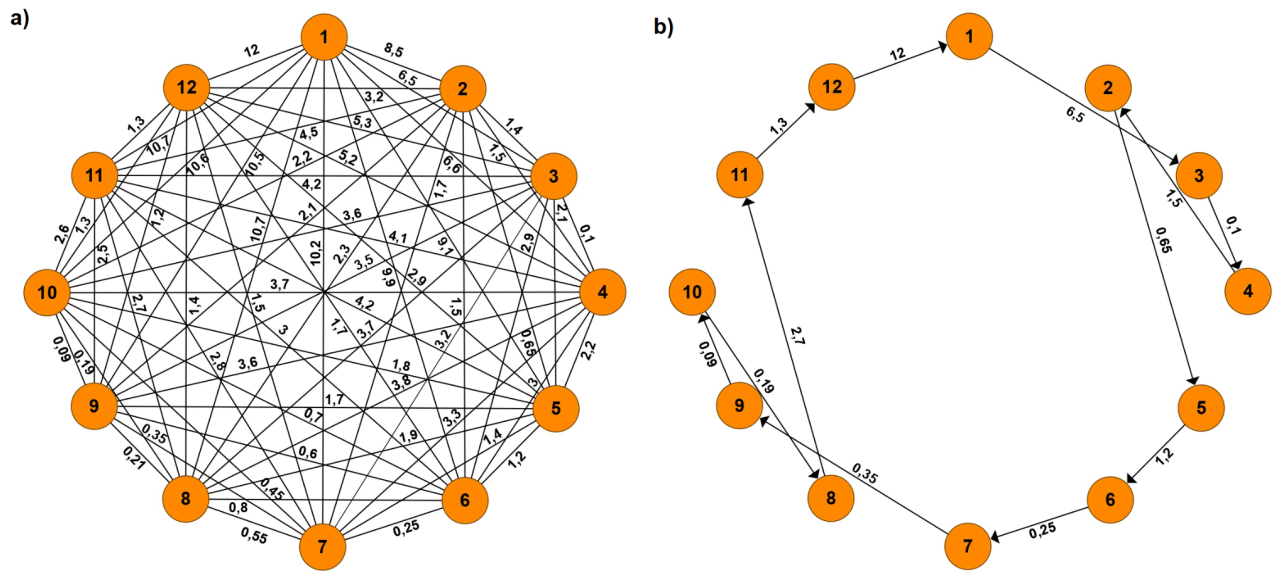
Tabela 1 - Matriz das distâncias em Km entre todos os pontos

		Empresa	Cliente A	Cliente B	Cliente C	Cliente D	Cliente E	Cliente F	Cliente G	Cliente H	Cliente I	Cliente J	Cliente K
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Empresa	1	-	8,5	6,5	6,6	9,1	9,9	10,2	10,7	10,5	10,6	11	12
Cliente A	2	8,5	-	1,4	1,5	0,65	1,5	1,7	2,3	2,1	2,2	4,5	3,2
Cliente B	3	6,5	1,4	-	0,1	2,1	2,9	3,2	3,7	3,5	3,6	4,2	5,3
Cliente C	4	6,6	1,5	0,1	-	2,2	3	3,3	3,8	3,6	3,7	4,1	5,2
Cliente D	5	9,1	0,65	2,1	2,2	-	1,2	1,4	1,9	1,7	1,8	4,2	2,9
Cliente E	6	9,9	1,5	2,9	3	1,2	-	0,25	0,8	0,6	0,7	3	1,7
Cliente F	7	10,2	1,7	3,2	3,3	1,4	0,25	-	0,55	0,35	0,45	2,8	1,5
Cliente G	8	10,7	2,3	3,7	3,8	1,9	0,8	0,55	-	0,21	0,19	2,7	1,4
Cliente H	9	10,5	2,1	3,5	3,6	1,7	0,6	0,35	0,21	-	0,09	2,5	1,2
Cliente I	10	10,6	2,2	3,6	3,7	1,8	0,7	0,45	0,19	0,09	-	2,6	1,3
Cliente J	11	10,7	4,5	4,2	4,1	4,2	3	2,8	2,7	2,5	2,6	-	1,3
Cliente K	12	12	3,2	5,3	5,2	2,9	1,7	1,5	1,4	1,2	1,3	1,3	-

Fonte: Autores (2024)

Com o auxílio da Tabela 1 e do *software* yEd Live®, foi possível criar um grafo orientado que representa todas as distâncias entre os nós, que correspondem aos onze clientes e a empresa, como ilustrado na Figura 2a.

Figura 2 - Representação gráfica completa do PCV da empresa de rações e a rota atual utilizada



Fonte: Autores (2024)

Dado que não existe um critério estabelecido para a ordem das entregas, a decisão sobre o trajeto a ser percorrido cabe ao motorista de acordo com a sua experiência. A Figura 2b apresenta a rota atualmente utilizada pelo motorista. Ao somar as distâncias entre os

pontos conectados nessa rota, verifica-se que o total percorrido para atender todos os clientes em uma única viagem é de 26,83 km.

4.2 Modelo matemático

A partir dos dados apresentados na Tabela 1 e na Figura 2a, foi possível desenvolver um modelo matemático voltado para a otimização da rota de entrega de rações, utilizando a abordagem do Problema do Caixeiro Viajante Simétrico. Este modelo abrange as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições pertinentes ao problema, configurando uma estrutura robusta para minimizar a distância percorrida durante as entregas.

Variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a empresa for diretamente do cliente } i \text{ para o cliente } j, i < j, i=1, 2, \dots, 11, j=2, 3, \dots, 12 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Função objetivo:

$$\begin{aligned} \min Z = & 8,5x_{12} + 6,5x_{13} + 6,6x_{14} + 9,1x_{15} + 9,9x_{16} + 10,2x_{17} + 10,7x_{18} + 10,5x_{19} + \\ & 10,6x_{110} + 10,7x_{111} + 12x_{112} + 1,4x_{23} + 1,5x_{24} + 0,65x_{25} + 1,5x_{26} + 1,7x_{27} + 2,3x_{28} + \\ & 2,1x_{29} + 2,2x_{210} + 4,5x_{211} + 3,2x_{212} + 0,1x_{34} + 2,1x_{35} + 2,9x_{36} + 3,2x_{37} + 3,7x_{38} + \\ & 3,5x_{39} + 3,6x_{310} + 4,2x_{311} + 5,3x_{312} + 2,2x_{45} + 3x_{46} + 3,3x_{47} + 3,8x_{48} + 3,6x_{49} + \\ & 3,7x_{410} + 4,1x_{411} + 5,2x_{412} + 1,2x_{56} + 1,4x_{57} + 1,9x_{58} + 1,7x_{59} + 1,8x_{510} + 4,2x_{511} + \\ & 2,9x_{512} + 0,25x_{67} + 0,8x_{68} + 0,6x_{69} + 0,7x_{610} + 3x_{611} + 1,7x_{612} + 0,55x_{78} + 0,35x_{79} + \\ & 0,45x_{710} + 2,8x_{711} + 1,5x_{712} + 0,21x_{89} + 0,19x_{810} + 2,7x_{811} + 1,4x_{812} + 0,09x_{910} + \\ & 2,5x_{911} + 1,2x_{912} + 2,6x_{1011} + 1,3x_{1012} + 1,3x_{1112} \end{aligned} \quad (1)$$

Restrições:

$$x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} + x_{19} + x_{110} + x_{111} + x_{112} = 2 \quad (2)$$

$$x_{12} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} + x_{28} + x_{29} + x_{210} + x_{211} + x_{212} = 2 \quad (3)$$

$$x_{13} + x_{23} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} + x_{38} + x_{39} + x_{310} + x_{311} + x_{312} = 2 \quad (4)$$

$$x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{45} + x_{46} + x_{47} + x_{48} + x_{49} + x_{410} + x_{411} + x_{412} = 2 \quad (5)$$

$$x_{15} + x_{25} + x_{35} + x_{45} + x_{56} + x_{57} + x_{58} + x_{59} + x_{510} + x_{511} + x_{512} = 2 \quad (6)$$

$$x_{16} + x_{26} + x_{36} + x_{46} + x_{56} + x_{67} + x_{68} + x_{69} + x_{610} + x_{611} + x_{612} = 2 \quad (7)$$

$$x_{17} + x_{27} + x_{37} + x_{47} + x_{57} + x_{67} + x_{78} + x_{79} + x_{710} + x_{711} + x_{712} = 2 \quad (8)$$

$$x_{18} + x_{28} + x_{38} + x_{48} + x_{58} + x_{68} + x_{78} + x_{89} + x_{810} + x_{811} + x_{812} = 2 \quad (9)$$

$$x_{19} + x_{29} + x_{39} + x_{49} + x_{59} + x_{69} + x_{79} + x_{89} + x_{910} + x_{911} + x_{912} = 2 \quad (10)$$

$$x_{110} + x_{210} + x_{310} + x_{410} + x_{510} + x_{610} + x_{710} + x_{810} + x_{910} + x_{1011} + x_{1012} = 2 \quad (11)$$

$$x_{111} + x_{211} + x_{311} + x_{411} + x_{511} + x_{611} + x_{711} + x_{811} + x_{911} + x_{1011} + x_{1112} = 2 \quad (12)$$

$$x_{112} + x_{212} + x_{312} + x_{412} + x_{512} + x_{612} + x_{712} + x_{812} + x_{912} + x_{1012} + x_{1112} = 2 \tag{13}$$

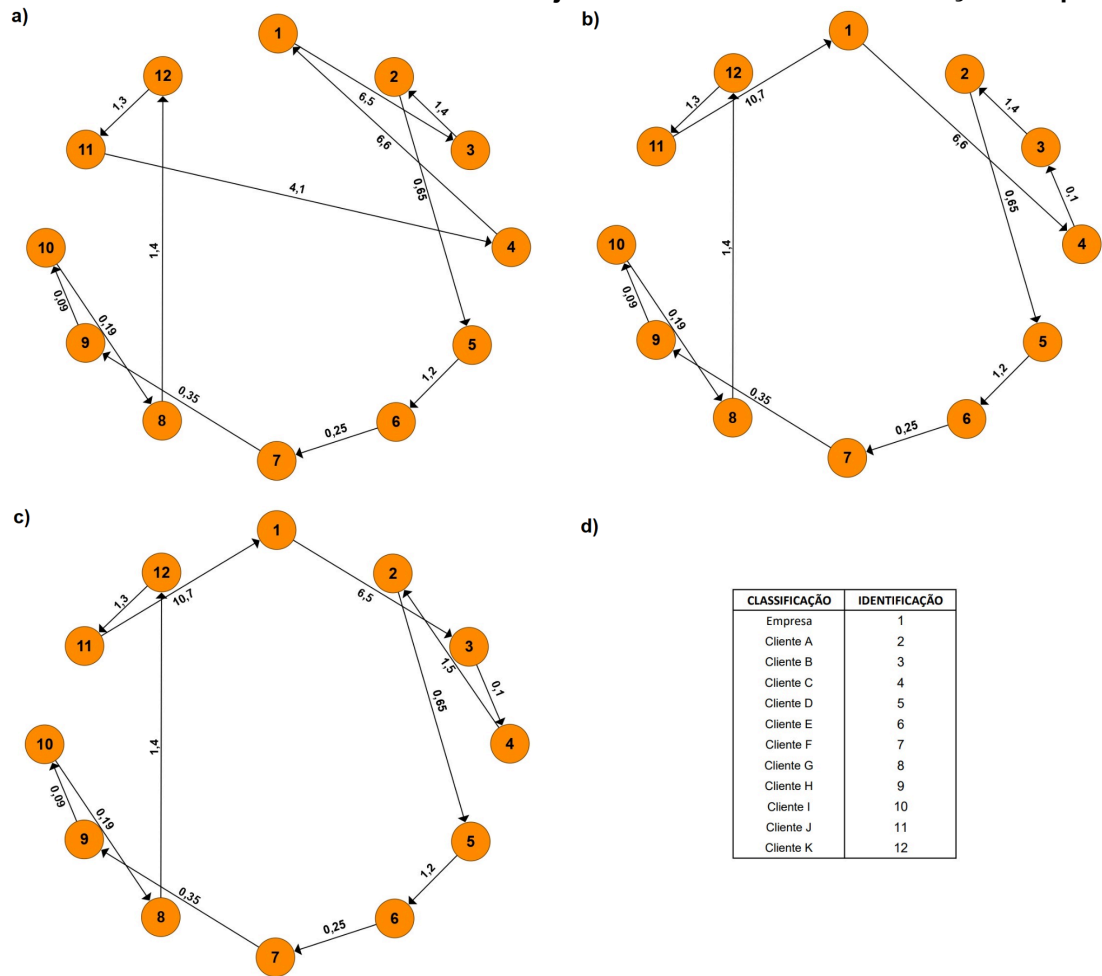
$$x \in B^{66} \tag{14}$$

4.3 Solução do modelo

No contexto de roteirização, a solução ótima visa minimizar a distância total percorrida, garantindo uma operação eficiente e eficaz. Após a construção do modelo matemático, foi possível implementá-lo no CPLEX® para identificar a solução ideal. Os resultados indicam que, ao partir do nó 1 (distribuidora), o motorista deve seguir a rota pelos nós 3, 2, 5, 6, 7, 9, 10, 8, 12, 11 e 4, retornando ao ponto inicial ao final do trajeto. Esta rota ótima, apresentada na Figura 3a, resulta em uma distância total percorrida de 24,03 km.

A Figura 3b ilustra o resultado obtido pela heurística gulosa, com uma distância total de 24,23 km. Nesta rota, o percurso começa no nó 1, segue pelos nós 4, 3, 2, 5, 6, 7, 9, 10, 8, 12 e 11, e termina retornando ao ponto de partida. Já a Figura 3c representa a rota gerada pela heurística do vizinho mais próximo, onde o trajeto também se inicia no nó 1 e prossegue pelos nós 3, 4, 2, 5, 6, 7, 9, 10, 8, 12 e 11, resultando em uma distância total de 24,23 km. Essas três abordagens possibilitam a comparação entre métodos de otimização e heurísticas alternativas, destacando diferenças sutis nas distâncias percorridas e nos trajetos selecionados para o objetivo de roteirização.

Figura 3 - Rotas alternativas encontradas com a heurística gulosa, heurística do vizinho mais próximo e a rota ótima resultante do CPLEX ® junto com a tabela de identificação dos pontos



Fonte: Autores (2024)

A Tabela 2 apresenta os resultados da solução ótima e das heurísticas para o PCV, permitindo uma comparação com a rota atualmente utilizada pela distribuidora.

Tabela 2 - Comparação entre os resultados obtidos pela solução ótima, rotas alternativas e rota atual

TABELA DE COMPARAÇÃO							
ROTA	SEQUÊNCIA	QUINZENAL					
		DISTÂNCIA	Δ	CONSUMO	Δ	CONSUMO TOTAL	Δ
ATUAL	1 - 3 - 4 - 2 - 5 - 6 - 7 - 9 - 10 - 8 - 11 - 12 - 1	26,83 km	-	4,47 L	-	R\$ 26,92	-
ÓTIMA	1 - 3 - 2 - 5 - 6 - 7 - 9 - 10 - 8 - 12 - 11 - 4 - 1	24,03 km	2,80 km	4,01 L	0,47 L	R\$ 24,11	R\$ 2,81
GULOSA	1 - 4 - 3 - 2 - 5 - 6 - 7 - 9 - 10 - 8 - 12 - 11 - 1	24,23 km	2,60 km	4,04 L	0,43 L	R\$ 24,31	R\$ 2,61
VIZINHO MAIS PRÓX.	1 - 3 - 4 - 2 - 5 - 6 - 7 - 9 - 10 - 8 - 12 - 11 - 1	24,23 km	2,60 km	4,04 L	0,43 L	R\$ 24,31	R\$ 2,61
ROTA	SEQUÊNCIA	ANUAL					
		DISTÂNCIA	Δ	CONSUMO	Δ	CONSUMO TOTAL	Δ
ATUAL	1 - 3 - 4 - 2 - 5 - 6 - 7 - 9 - 10 - 8 - 11 - 12 - 1	643,92 km	-	107,32 L	-	R\$ 646,07	-
ÓTIMA	1 - 3 - 2 - 5 - 6 - 7 - 9 - 10 - 8 - 12 - 11 - 4 - 1	576,72 km	67,20 km	96,12 L	11,20 L	R\$ 578,64	R\$ 67,42
GULOSA	1 - 4 - 3 - 2 - 5 - 6 - 7 - 9 - 10 - 8 - 12 - 11 - 1	581,52 km	62,40 km	96,92 L	10,40 L	R\$ 583,46	R\$ 62,61
VIZINHO MAIS PRÓX.	1 - 3 - 4 - 2 - 5 - 6 - 7 - 9 - 10 - 8 - 12 - 11 - 1	581,52 km	62,40 km	96,92 L	10,40 L	R\$ 583,46	R\$ 62,61

Fonte: Autores (2024)

5. Conclusões

O projeto desenvolvido apresenta um modelo matemático robusto voltado para a otimização das rotas de entrega de uma empresa do setor de rações, utilizando o problema do caixeiro viajante (PCV). A implementação desse modelo resultou em uma redução significativa na quilometragem total percorrida, impactando positivamente tanto os custos operacionais quanto o consumo de combustível. Além disso, essa otimização contribui para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se às práticas sustentáveis no setor logístico. Entretanto, é essencial reconhecer que, apesar da eficácia matemática do modelo, sua aplicação prática pode enfrentar desafios relacionados a fatores que não foram considerados inicialmente, como as variações no tráfego, as condições das estradas e imprevistos operacionais. Ademais, a introdução de mudanças na logística pode exigir ajustes no planejamento e na gestão operacional, o que pode gerar complexidades adicionais.

Com base nas experiências adquiridas durante este projeto, a programação linear se mostra aplicável em diversos outros contextos logísticos, incluindo a otimização de estoques, a alocação de recursos e o planejamento de produção, podendo auxiliar ainda mais a empresa em outras vertentes. Além disso, áreas como a seleção de fornecedores e a formulação de políticas de transporte também poderiam se beneficiar dessas técnicas de otimização, resultando em operações mais eficientes e sustentáveis. Essas considerações ressaltam a importância da aplicação de métodos quantitativos na tomada de decisões operacionais. A adoção de tais abordagens fornece uma base sólida para a melhoria contínua dos processos, promovendo um aumento significativo na competitividade no mercado.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). **Relatório de Produção e Expectativas do Setor**. 2023. Disponível em: <www.abpa.com.br>. Acesso em: 3 ago. 2024.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, YANASSE, H. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA USP). **Análise do Mercado Lácteo**. 2023. Disponível em: <www.cepea.esalq.usp.br>. Acesso em: 3 ago. 2024.

DANTZIG, George B.; RAMSER, Robert H. The Truck Dispatching Problem. **Management Science**, v. 6, n. 1, p. 80-91, 1959.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. [S.l.]: Elsevier, 2005.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. **Introdução à pesquisa operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

LONGARAY, A. A. **Introdução à pesquisa operacional**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2013.

MARTINS, A. R. Abordagens quantitativa e qualitativa. In: CAUCHICK-MIGUEL, P. A. (Coo.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

MORO, M. F. et al. Técnicas de pesquisa operacional aplicadas na otimização de rotas de uma rede de lojas de materiais de construção. **Produção em foco**, v. 8, n. 3, 5 set. 2018.

PINTO, L. F. M. **Modelagem matemática: conceitos, ferramentas e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2001.

PRADO, D. S. **Programação Linear**. 7. ed. Nova Lima: Falconi, 2016.

SAMPIERI, Rui C.; COLLADO, Carlos F.; GARCÍA, Pablo. **Metodologia de Pesquisa**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2013.

SILVA, E. M.; SILVA, E. M.; GONÇALVES, V.; MUROLO, A. C. **Pesquisa operacional para os cursos de administração e engenharia: programação linear: simulação**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE ALIMENTAÇÃO ANIMAL (SINDIRAÇÕES). **Relatório Anual 2023**. Disponível em: <www.sindiracoes.org.br>. Acesso em: 4 ago. 2024.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional: uma visão geral**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TOTH, P.; VIGO, D. **The Vehicle Routing Problem**. Philadelphia: SIAM, 2014.