



MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ROTEIRIZAÇÃO DE ENTREGAS EM UM CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO

JOÃO GABRIEL SANTIAGO SILVA - santiagojoaogabriel@gmail.com
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE - UFS - SÃO CRISTOVÃO

BRENDA RAYSSA MATOS SANTANA - brendarayssa@academico.ufs.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE - UFS - SÃO CRISTOVÃO

CELSO SATOSHI SAKURABA - sakuraba@ufs.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE - UFS - SÃO CRISTOVÃO

ÁREA: 03. PESQUISA OPERACIONAL

SUBÁREA: 3.1 - MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

Resumo: ESTE TRABALHO APRESENTA FERRAMENTAS PARA A OTIMIZAÇÃO DE ROTAS QUE COMPÕEM A DISTRIBUIÇÃO DE INSUMOS QUÍMICOS REALIZADA POR UM CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO (CD). CONSIDEROU-SE COMO PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA ESTUDADO O FATO DE APENAS UM CAMINHÃO VISITAR TODOS OS CLIENTES EM DIFERENTES DIAS DO MÊS E A CAPACIDADE DO VEÍCULO. FOI APLICADA UMA FORMULAÇÃO EXATA DO PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS CAPACITADO (CVRP) COMO PRINCIPAL MECANISMO DE OTIMIZAÇÃO. DUAS ESTRATÉGIAS DE AGRUPAMENTO DE CLIENTES FORAM UTILIZADAS PARA A REDUÇÃO DO TAMANHO DO PROBLEMA: A DETERMINAÇÃO DE AGRUPAMENTOS K-MEANS E O USO DOS AGRUPAMENTOS ADMINISTRATIVOS JÁ ADOTADOS PELO CD. OS RESULTADOS OBTIDOS DEMONSTRAM A EFICÁCIA DA FORMULAÇÃO PARA O CVRP. O USO DOS AGRUPAMENTOS JÁ EXISTENTES APRESENTOU MAIORES REDUÇÕES NAS DISTÂNCIAS DE DISTRIBUIÇÃO QUANDO COMPARADO AOS AGRUPAMENTOS K-MEANS. PARA VALIDAR AMBAS AS ABORDAGENS, FORAM CONSIDERADOS OS TEMPOS DE PERCURSO E DE DESCARGA DE MATERIAIS ESTABELECIDOS PELA EMPRESA E A JORNADA DE TRABALHO DA EQUIPE. EMPREGOU-SE PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE E DIVISÃO DE ROTAS QUE PERMITIRAM A CONSTRUÇÃO DE ROTEIROS COM MENOR GRAU DE OTIMIZAÇÃO, MAS COM APLICABILIDADE PARA O CD.

Palavras-chave: PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS CAPACITADOS; ALGORITMO EXATO; AGRUPAMENTO DE CLIENTES; OTIMIZAÇÃO DE ROTAS.



1. INTRODUÇÃO

A logística é crucial para as empresas, permitindo que insumos e produtos cheguem aos clientes no prazo e local adequados. Decisões de transporte são essenciais devido ao impacto significativo que têm nos custos logísticos totais, representando de um a dois terços desses custos. A otimização de rotas para reduzir tempos e distâncias é comum, resultando em menores custos e melhor serviço. O planejamento inclui resolver problemas de roteirização e programação de veículos. Métodos ad hoc são frequentemente usados para definir rotas com base na experiência do analista, mas problemas complexos podem exigir modelagem e resolução computacional, aproveitando grandes volumes de dados para otimização dos custos logísticos.

Diversas organizações necessitam realizar tal planejamento, seja para a entrega de produtos aos seus clientes ou para movimentar materiais entre diferentes unidades de uma empresa. Em muitas delas, os produtos e materiais partem de um Centro de Distribuição (CD) com destino a clientes internos ou externos. Este é o caso da Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO) que opera em todo o estado, abastecendo água e tratando esgoto em 74 dos 75 municípios do Estado. Possui 83 Estações de Tratamento (ETs) que utilizam insumos químicos para transformar água bruta em água potável.

O Centro de Distribuição da DESO atende mensalmente a demanda de insumos químicos para 42 unidades de tratamento usando um único veículo, com viagens diárias pelo estado. A equipe logística utiliza métodos ad hoc para roteirização, agrupando previamente as ETs. A capacidade dos veículos e a experiência dos funcionários são cruciais na definição das rotas. O Problema de Roteirização de Veículos Capacitado (CVRP) é considerado adequado para modelar essas operações, incorporando a limitação de capacidade dos veículos para atender a demanda dos clientes.

Este estudo integrado propõe otimizar a logística de entrega de insumos químicos sólidos pelo CD da DESO. Utilizando métodos de agrupamento de clientes, capacidade do veículo e roteirização, busca-se minimizar o custo total de transporte. A abordagem holística visa aumentar a eficiência operacional e reduzir custos. A metodologia desenvolvida ajudará a empresa a decidir quais unidades atender em quais rotas, priorizando a minimização de distâncias. As restrições de tempo da jornada de trabalho dos funcionários são consideradas para validar as rotas otimizadas, garantindo que a solução seja aplicável na prática.



2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho é otimizar rotas de distribuição de insumos químicos para um Centro de Distribuição, reduzindo distâncias percorridas.

2.2 Objetivos Específicos

Para se atingir o objetivo geral foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar a capacidade do veículo e demandas dos clientes;
- b) Propor agrupamentos de clientes mais otimizados;
- c) Utilizar um modelo de roteirização com dados reais e validar resultados;
- d) Comparar rotas atuais com as geradas pelo algoritmo.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Logística e Roteirização de Veículos

O transporte de mercadorias, assim como o armazenamento, é essencial na logística de distribuição. O CD de uma empresa é crucial, concentrando os maiores custos logísticos, especialmente relacionados às operações de veículos e equipes, que representam entre um e dois terços dos custos totais. Para resolver esses desafios, são desenvolvidos modelos que simplificam a realidade e priorizam os principais aspectos do problema, buscando qualidade de resultados em tempo razoável, apesar das dificuldades em capturar todos os detalhes complexos. Esses modelos aproveitam características específicas do problema e, às vezes, recorrem a métodos de otimização já estabelecidos.

Goldbarg e Luna (2005) destacam que a roteirização pode reduzir custos com diferentes objetivos, como prazos de entrega mais curtos, percursos mais eficientes ou melhor distribuição de recursos humanos. Além dos benefícios econômicos, produtos essenciais como combustíveis e remédios dependem de planejamento preciso para evitar escassez. A roteirização também visa benefícios socioambientais, como a redução de emissões de gases poluentes, manutenção da qualidade dos materiais durante o transporte, minimização de riscos ocupacionais, melhores condições para os trabalhadores e entregas mais confiáveis para os clientes.



3.2 Problemas de Roteirização de Veículos Capacitados

O Problema de Roteirização de Veículos Capacitados (CVRP) é uma extensão do Problema de Roteirização de Veículos (VRP) que incorpora restrições de capacidade dos veículos. Neste problema, uma frota de veículos de capacidade idêntica deve atender uma série de clientes com demandas conhecidas. A solução do CVRP é abordada por métodos exatos e heurísticos, que visam encontrar rotas eficientes para minimizar custos logísticos, como distância percorrida ou número de veículos utilizados.

Ao enunciar o CVRP, considera-se o conjunto de clientes $N = \{1, 2, \dots, n\}$ com demanda $q_i > 0$ para cada cliente $i \in N$, visitados pela frota de veículos $K = \{1, 2, \dots, |K|\}$. Quando a frota é homogênea, todos os caminhões possuem a mesma capacidade $Q > 0$. As demandas e capacidades representam a massa ou volume dos produtos a serem transportados. Cada veículo realiza um circuito fechado, iniciando sua viagem no CD, atendendo um agrupamento de clientes $S \subseteq N$ e retornando ao CD. Cada cliente deve ser visitado apenas uma vez, e os veículos realizam os percursos a um custo $c_{ij} \geq 0$.

O CVRP pode ser representado através do grafo $G = (V, E)$ quando consideramos caminhos não orientados, no qual o custo independe do sentido de locomoção. Define-se $V = \{0\} \cup N$ como o conjunto de todos os nós que contém o CD, localizado no nó 0, e todos os clientes. E é o conjunto de arestas, correspondendo a vias com custos de deslocamento c_{ij} . Ao final, obtemos no máximo $|K|$ rotas, uma para cada veículo. Já o problema para os grafos orientados, no qual o custo varia a depender do sentido de locomoção, difere da versão não orientada por apresentar o conjunto de arcos direcionados $A = (i, j) \in V \times V : i \neq j$, sendo o grafo representado por $G = (V, A)$.

As soluções do CVRP consistem em rotas descritas como $r = (i_0, i_1, i_2, \dots, i_s, i_{s+1})$, em que $i_0 = i_{s+1} = 0$, representa o CD e $S = (i_1, i_2, \dots, i_s) \subseteq N$ o agrupamento de clientes visitado pelo veículo.

3.3. Estratégias para Agrupamentos de Clientes

Diferentes estratégias para a resolução do CVRP foram elaboradas, como as desenvolvidas para o Problema de Roteirização de Veículos Capacitados Agrupados, que considera agrupamentos de clientes já adotados por empresas realizados a partir de sua



localização geográfica. Desta forma, é possível definir veículos para atender determinadas zonas e posteriormente aplicar o Problema de Roteirização de Veículos para cada agrupamento de clientes, resultando em instâncias menores do que a população total a ser atendida (BARTHÉLEMY et al., 2010; SEVAUX; SÖRENSEN, 2008).

Estratégias de agrupamento de clientes são frequentemente utilizadas nos Problemas de Roteamento de Veículo, dado que são NP-difíceis e agrupamentos possibilitam a redução de instâncias do problema. Para a execução dessas estratégias, deve-se buscar padrões de semelhança na população a ser analisada e selecionar um dos diferentes métodos de agrupamento (HE et al., 2009; WANG et al., 2018).

As metodologias para Problemas de Roteirização vão além do uso agrupamentos já estabelecidos por empresas. Diversos estudos utilizaram o algoritmo *k-means* e conseguiram obter bons resultados na redução do tempo de resolução e na otimização de rotas. O *k-means* foi enunciado por MacQueen (1967) e visa particionar um conjunto N de elementos em uma quantidade k de agrupamentos. Sahoo et al. (2005) apresentam o agrupamento *k-means* associado ao VRP com janelas de tempo como método de roteirização utilizado por uma empresa de gerenciamento de resíduos sólidos. A implantação desta metodologia resultou ganhos econômicos de 18 milhões de dólares no primeiro ano.

He et al. (2009) pesquisaram o uso do *k-means* em larga escala precedendo uma otimização pelo VRP. Neste estudo 1882 clientes são reunidos em cinco agrupamentos com tamanhos e demandas semelhantes. Luo e Chen (2014) e Reed, Yiannakou e Evering (2014) obtiveram sucesso ao utilizar agrupamentos *k-means* para reduzir os tempos de execução do CVRP e de outros algoritmos de roteirização. Wang et al. (2020) e Liu e Liao (2021) também utilizaram o *k-means* como uma etapa de pré-processamento, reduzindo o tamanho do problema e viabilizando a aplicação de um algoritmo de roteirização, os resultados obtidos demonstram uma otimização eficaz.

Reed, Yiannakou e Evering (2014) indicam que a aplicação do *k-means* deve ser iniciada pela divisão da demanda total dos clientes pela capacidade de um veículo da frota, obtendo a quantidade k de agrupamentos. Em seguida, deve-se utilizar as coordenadas geográficas dos clientes e distribuir aleatoriamente os k centroides. O algoritmo inicialmente aloca os clientes mais próximos ao centroide, depois balanceia a demanda de modo que nenhum agrupamento tenha demanda maior do que a capacidade de um veículo. Os centroides são então



novamente calculados, clientes são realocados próximos aos novos centroides e mais uma vez ocorre o balanceamento de demandas. Este processo é repetido até que se obtenha agrupamentos balanceados e não ocorram alterações na localização dos centroides.

Talbi (2013) apresenta uma aplicação do *k-means* para um Problema de Roteirização de Veículos com 17 clientes. Na versão inicial do problema, todos os clientes são utilizados na execução do CVRP. Com a aplicação do *k-means*, foram obtidos três agrupamentos de clientes com no máximo seis clientes cada. Para cada agrupamento é aplicado o VRP em instâncias menores e consequente redução na complexidade de resolução.

Em sua maioria, determinações de agrupamentos *k-means* consideram distâncias euclidianas (em linha reta) entre nós (HE et al., 2009; LIU; LIAO, 2021; REED; YIANNAKOU; EVERING, 2014). Ballou, Rahardja e Sakai (2002) indicam que as variações entre as distâncias euclidianas e as distâncias reais são comuns e dependem de fatores como rede de estradas, existência de obstáculos (montanhas, lagos, mares e reservas), inclinações no território e precisão na definição de coordenadas.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa realizou o levantamento de informações em uma organização seguido da elaboração de soluções. Este estudo tem o seu delineamento como modelagem e simulação, pois a partir dos dados coletados no problema real foi aplicado um método de roteirização de veículos de forma computadorizada e obteve-se resultados que visam sua otimização. As principais etapas da pesquisa, mostradas na Figura 1.

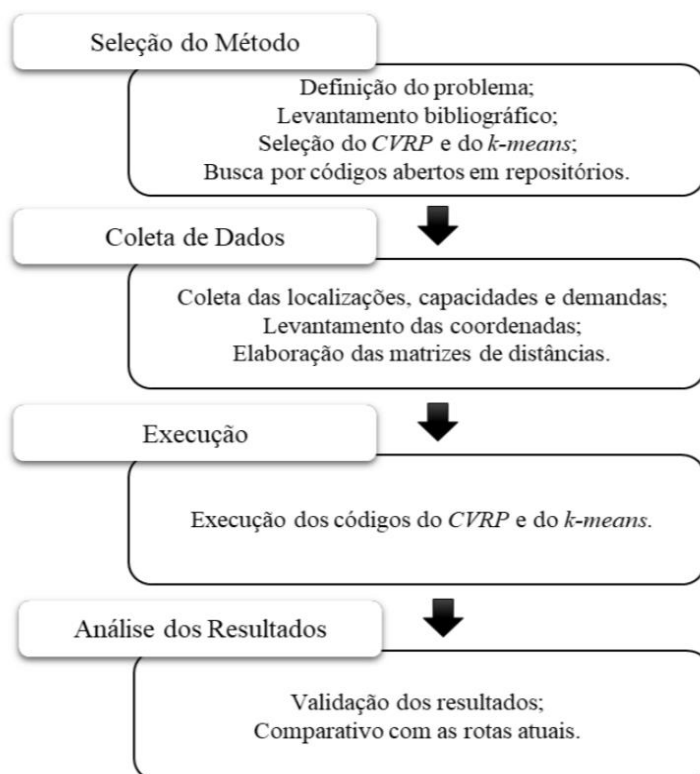
4.1 Implantação do Agrupamento *k-means*

K-means é utilizado com coordenadas geográficas para agrupar clientes e otimizar rotas. Foi utilizado um código em Python, similar ao de Reed, Yiannakou e Evering (2014). O código divide a demanda dos clientes pela capacidade dos veículos, constrói grupos baseados em localizações, assegura que nenhum grupo exceda a capacidade dos veículos, e resolve o Problema do Caixeiro-Viajante para cada grupo.

O código finaliza com a determinação de rotas para cada agrupamento de clientes. O Problema do Caixeiro-Viajante é executado a partir de biblioteca python-tsp. Estabelecer 26

agrupamentos foi a estratégia utilizada para reduzir a complexidade do problema, pois resulta em instâncias menores. Um pseudocódigo é apresentado na Figura 2.

FIGURA 1 - Procedimentos metodológicos



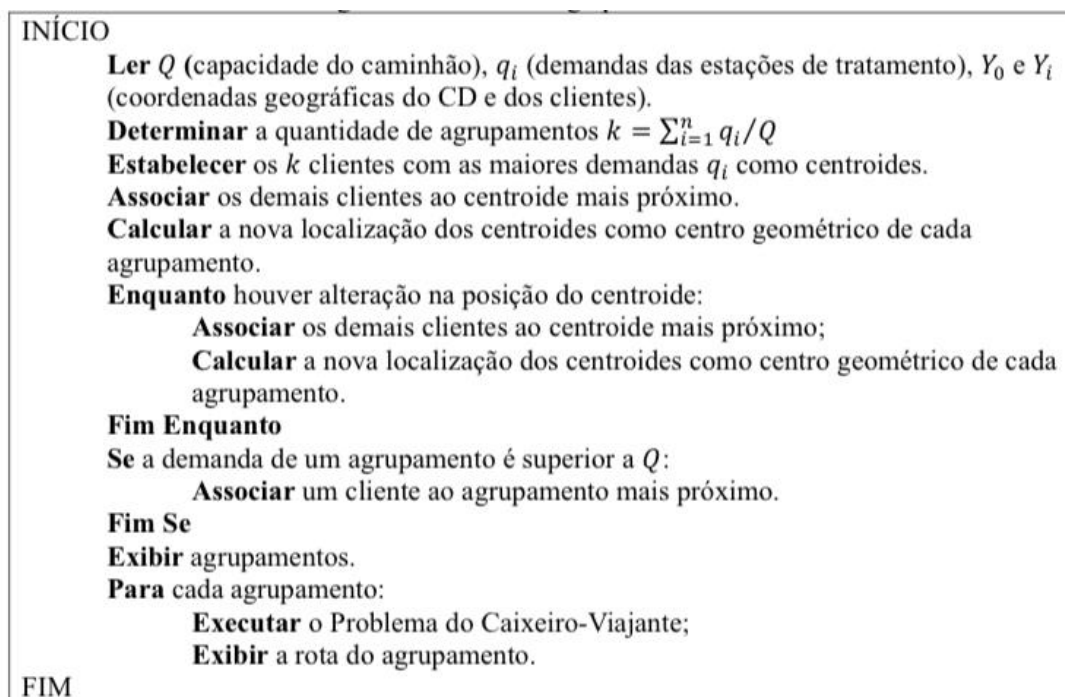
Fonte: Autoria própria.

4.2 Coleta de dados

Para resolver o problema logístico, dados de entrada como coordenadas dos clientes e do CD, uma matriz de distância, demandas mensais dos clientes e a capacidade do caminhão (5.900 kg) foram fornecidos pela empresa. As ETs foram agrupadas em cinco regionais: Centro-Oeste, Metropolitana, Norte, Sertão e Sul, com o CD localizado em Nossa Senhora do Socorro. A seleção das ETs considerou apenas aquelas cuja demanda mensal não excede a capacidade do caminhão. ETs da Regional Metropolitana e algumas da Regional Sertão com demanda igual ou superior à capacidade do caminhão foram excluídas devido à necessidade de viagens exclusivas para atendê-las.



FIGURA 2 – Pseudocódigo



Fonte: Autoria própria.

Para facilitar a definição de rotas, o CD unificou as ETs das regionais Sertão e Norte em três agrupamentos principais: Regional Norte-Sertão, Regional Centro-Oeste e Regional Sul. Cada agrupamento representa áreas geográficas distintas onde os clientes são atendidos com diferentes tipos e quantidades de insumos químicos sólidos, como Ácido Tricloroisocianúrico, Dicloroisocianurato de Sódio, Fluorsilicato de Sódio, Carbonato de Sódio e Sulfato de Alumínio. Como referência as demandas disponibilizadas pela empresa referentes ao mês de janeiro, com os endereços das ETs obtidos via Google Maps para obter as coordenadas geográficas. Essas coordenadas foram convertidas do sistema decimal para o sistema Universal Transversal de Mercator (UTM) usando o software TCGeo versão 0.7 do IBGE, necessário para serem utilizadas como dados de entrada no código do algoritmo *k-means* de agrupamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O CD e as 39 ETs analisados nesta pesquisa receberam uma identificação numérica para facilitar a descrição de rotas. Em todas as rotas, o caminhão inicia e finaliza a distribuição no



CD, identificado como “0”, visitando determinado agrupamento de clientes. Rotas como estas são características de todos os problemas de roteirização utilizados no presente trabalho. Durante o mês de janeiro, a equipe do CD realizou a cronometragem do descarregamento de insumos químicos e registro das demandas mensais totais em cada ET. Não foi possível obter os dados relacionados aos tempos de carregamento de materiais, que foram estimados e reduzidos da jornada de trabalho.

5.1 Rotas Atuais

O CD forneceu as rotas utilizadas em janeiro para a distribuição dos insumos químicos sólidos às 39 ETs analisadas. As distâncias e tempos de deslocamento foram obtidos pelo Google Maps, utilizando o critério de menor distância entre dois pontos, para facilitar a comparação com os resultados do *k-means* e do CVRP.

TABELA 1 – Rotas utilizadas pelo CD

Reg.	Rota	Demanda (kg)	Tempo de descarga (h)	Tempo de deslocamento (h)	Tempo total (h)	Deslocamento utilizado (km)
CO1	0-1-2-3-4-5-6-7-0	4000	2,42	3,85	6,27	179,8
CO2	0-8-9-10-11-12-13-0	2800	1,75	3,20	4,95	140,7
CO3	0-14-0	5000	2,00	2,30	4,30	113,6
SU1	0-15-16-0	1700	2,00	4,35	6,35	269,3
SU2	0-17-18-19-20-21-22-0	3700	2,17	4,65	6,82	240,7
SU3	0-23-24-25-26-0	3950	1,33	4,70	6,03	277,1
NS1	0-27-28-0	2300	2,00	2,98	4,98	148,9
NS2	0-29-30-31-32-33-0	3050	2,17	5,50	5,67	266,6
NS3	0-34-35-0	3700	2,33	2,03	4,36	107,9
NS4	0-36-37-38-39-0	4950	2,50	5,95	8,45	328,8
Total	-	35150	18,17	39,51	58,18	2073,4

Fonte: Autoria própria.

Em janeiro, o CD estabeleceu dez rotas para atender as ETs, identificadas pelas regionais Centro-Oeste (CO), Sul (SU) e Norte-Sertão (NS). Cada rota tinha uma carga média de 3.515 kg, representando 59,57% da capacidade total do caminhão. A equipe visou minimizar lacunas na capacidade utilizada para reduzir os 2.073,4 km percorridos durante a distribuição.

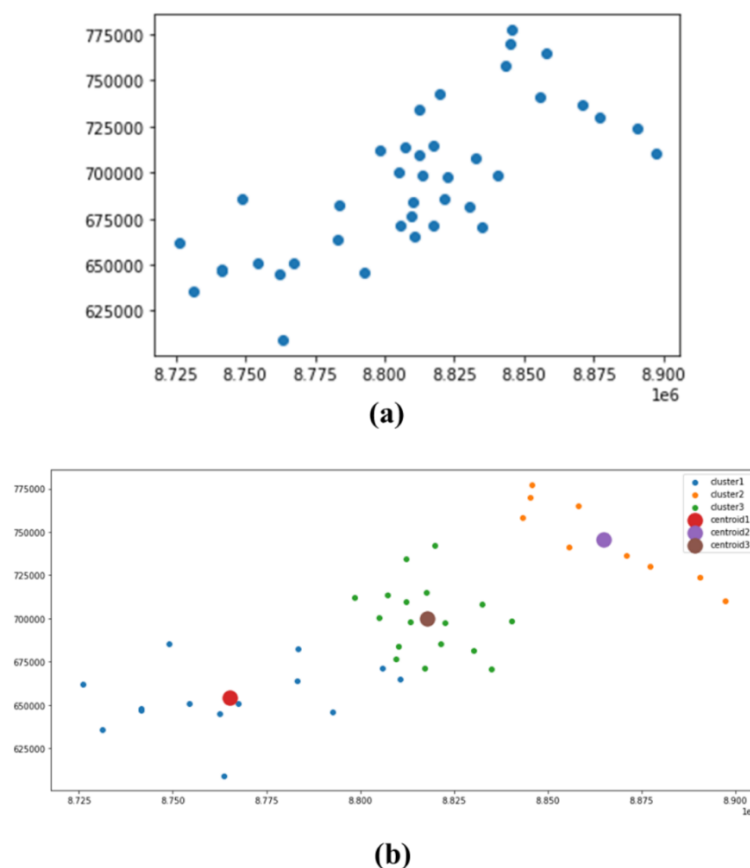


O tempo máximo de 8,45h horas para a rota NS4 foi determinante, incluindo o deslocamento e o tempo para descarregar os insumos, e serviu como critério de validação das rotas, considerado aceitável pela empresa.

5.2 Uso do agrupamento *k-means* e do CVRP

O estudo utilizou coordenadas geográficas em sistema UTM para 39 ETs e o CD, juntamente com as demandas e a capacidade do veículo, aplicando o algoritmo *k-means* para agrupar os clientes em três grandes clusters. Apesar da primeira tentativa sem sucesso devido a restrições de capacidade, uma segunda aplicação foi feita com a capacidade do veículo aumentada para 17.500 kg, resultando nos agrupamentos mostrados na Figura 3. Estes foram comparados com as regionais estabelecidas pela empresa (Centro-Oeste, Sul e Norte-Sertão), mostrando semelhanças significativas.

FIGURA 3 – (a) Localização dos CDs e clientes e (b) agrupamentos do *k-means*



Fonte: Autoria própria.



Para cada agrupamento, foram realizadas execuções do CVRP resultando em oito rotas e uma redução de 323,5 km (15,6%) em relação às rotas utilizadas pela empresa. No entanto, algumas destas rotas ultrapassavam o limite de tempo de jornada dos colaboradores, e foi feita uma nova rodada de testes utilizando o algoritmo aumentando o número de rotas e considerando tempos de carga e descarga estimados. Como resultado, foram obtidas rotas validadas pelos gestores da empresa com uma redução de 130,5 km (6,29%) na distância percorrida.

A otimização foi limitada pelo tempo de execução do código para o CVRP, revelando lacunas de otimização que estabilizaram após duas horas de processamento para os Agrupamentos 1 e 2. O Agrupamento 3 obteve uma redução acentuada na lacuna de otimização antes de atingir o limite de tempo do solucionador. Assim, duas horas foram consideradas adequadas para a execução do código, alcançando níveis aceitáveis de lacuna de otimização.

Esses resultados destacam a eficácia da abordagem adotada na redução dos deslocamentos e na gestão eficiente das rotas de distribuição, mesmo diante das limitações computacionais e temporais encontradas durante o processo de otimização.

5.3 Uso das Regionais e do CVRP

A segunda estratégia para otimização das rotas no problema inicial envolveu a aplicação do CVRP utilizando as divisões regionais. Foram desenvolvidas três matrizes adicionais de distâncias para cada área regional: Centro-Oeste (CO), Sul (SU) e Norte-Sertão (NS), cada uma com suas próprias demandas e capacidades de caminhão. Esta estratégia resultou em sete rotas.

TABELA 2 - Comparativo entre as rotas utilizadas e as rotas do CVRP com Regionais

Regional	Deslocamento utilizado (km)	Deslocamento CVRP (km)	Lacuna de otimização (%)	Redução de deslocamento (km)	Redução de deslocamento (%)
Centro-Oeste	434,1	381,1	6,29	51,0	11,75
Sul	787,1	560,1	27,70	227,0	28,84
Norte-Sertão	852,2	723,5	25,80	128,7	15,10
Total	2073,4	1664,7	-	406,7	16,61

Fonte: Autoria própria.

Foram feitas comparações entre as rotas derivadas do CVRP com divisões regionais e aquelas utilizadas pelo CD, conforme mostrado na Tabela 2. Esta comparação revelou uma



redução de 406,7 km ou 16,61% na distância total percorrida, indicando uma execução bem-sucedida da estratégia apesar das lacunas de otimização. Análises adicionais indicaram que tempos de execução mais longos não melhoraram significativamente a otimização além das reduções iniciais.

Para lidar com rotas que excederam os limites de tempo permitidos, as rotas foram divididas em segmentos viáveis. Após a segmentação, as rotas foram validadas para garantir conformidade com os limites de tempo, resultando em rotas otimizadas. A Tabela 3 fornece uma comparação entre as rotas inicialmente usadas, aquelas otimizadas pelo CVRP com divisões regionais e as rotas validadas após otimização.

TABELA 3 - Comparativo entre as rotas utilizadas e rotas validadas

Regional	Deslocamento utilizado (km)	Deslocamento CVRP (km)	Deslocamento após validação (km)	Redução após validação (km)	Redução após validação (%)
Centro-Oeste	434,1	381,1	381,1	51,0	11,75
Sul	787,1	560,1	753,3	33,8	4,29
Norte-Sertão	852,2	723,5	771,9	80,3	9,42
Total	2073,4	1664,7	1906,3	167,1	8,06

Fonte: Autoria própria.

A divisão de rotas que viabiliza a execução da distribuição ocasionou um aumento de 241,6km a serem percorridos quando comparamos com a aplicação teórica da segunda estratégia, na qual os tempos não são considerados. Entretanto, quando comparamos com os caminhos utilizados pelo CD, as rotas validadas também conseguem atingir reduções de deslocamento, em virtude da redução nas distâncias de distribuições para todas as Regionais.

Destaca-se a aplicação da segunda estratégia para a Regional Centro-Oeste, que teve todas as suas soluções validadas mantendo uma redução de 51km, ou 11,75%. Na Regional Sul, a divisão de rotas diminuiu a redução no deslocamento de 28,84% para 4,29%, e nas Regionais Norte-Sertão a redução que era 15,10% ficou em 9,42%.

As reduções totais permanecem significativas, pois foi possível atingir redução total de 167,1km, ou 8,06%, após validação e divisão de rotas. Portanto, pode-se recomendar o uso do CVRP para o CD estabelecer as rotas mensais de distribuição de insumos químicos sólidos.



Os resultados dos roteiros validados desta segunda estratégia podem ser comparados com os resultados validados provenientes da primeira estratégia. Nota-se que a aplicação do CVRP com o uso das Regionais resultou em uma distância total de 1.906,3 km, enquanto o CVRP com agrupamentos *k-means* obteve 1.942,9 km. Assim verifica-se que a eficácia decorrente da primeira estratégia ocorre pelo uso do CVRP e não pelos agrupamentos *k-means*, visto que o agrupamento em Regionais adotado na segunda estratégia atinge deslocamentos menores.

Deve-se aplicar a segunda estratégia, executar o CVRP para Regionais atuais e limitar em duas horas a execução do código de algoritmo exato. Este tempo apresenta viabilidade de execução em um dia de jornada de trabalho para equipe do CD, visto que as rotas são estabelecidas apenas uma vez ao mês. Deve-se lembrar que tempos maiores do que estes apresentam baixas velocidades na redução da lacuna de otimização e, portanto, pouco potencial de melhoria dos resultados.

A validação e divisão devem constituir o último passo a ser realizado na construção de rotas. Mesmo ocasionando perdas na otimização, a sua adoção viabiliza a distribuição realizada pelo CD e certa redução nas distâncias deslocamento é mantida.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi analisado o processo mensal de roteirização de insumos químicos sólidos realizado pelo Centro de Distribuição (CD) da DESO. Para a modelagem do problema foram investigados os dados de entrada do problema, referentes ao mês de janeiro de 2021, resultando na determinação de uma formulação exata do Problema de Roteirização de Veículos Capacitados (CVRP) como modelo básico apropriado para o problema. O modelo adotado contemplou relevantes características processo: um único veículo realiza a distribuição utilizando diferentes rotas e há a restrição de capacidade do veículo.

Foram apresentadas duas estratégias que permitiram reduções de instâncias na execução do CVRP. O uso de agrupamentos *k-means* resultou em menor grau de otimização, obtendo-se maiores deslocamentos totais quando comparado às aplicações realizadas com Regionais. Houve limitações na execução do algoritmo *k-means*, ocasionando alterações significativas no processo de construção de agrupamentos. Diversas outras pesquisas tiveram sucesso na



aplicação desta estratégia para a otimização de rotas, assim novos estudos podem ser realizados para o problema com a aplicação do k-means capacitado sem simplificações.

A segunda estratégia utilizada consistiu no uso de Regionais e do CVRP. Nesta aplicação foi possível verificar, a partir de um comparativo com as rotas utilizadas pelo CD, que este método proporciona redução de distâncias, otimizando a roteirização. Contudo foram desenvolvidas rotas com tempo de distribuição maior do que o aceitável pela empresa, por limitações na implementação do código, necessitando das etapas de validação e divisão de rotas que ocasionaram um menor grau de otimização. Então, há a possibilidade do desenvolvimento de novas pesquisas ao analisar o tempo disponível para a distribuição como restrição na formulação matemática do problema de roteirização.

Como não foi possível acompanhar as aplicações práticas da metodologia proposta, diversas outras oportunidades para trabalhos futuros podem ser identificadas. Podem ser avaliados os custos financeiros decorrentes da aplicação da estratégia proposta, comparando as reduções no consumo de combustível decorrente da otimização de rotas com possíveis pagamentos de horas-extras. Também é possível estudar o impacto da otimização de rotas nas jornadas de trabalho, com decisões da empresa sobre o bem-estar do empregado que necessitaria visitar a mesma quantidade de Estações de Tratamento em um menor número de rotas.

De modo geral, os resultados obtidos indicam que o objetivo geral da pesquisa foi alcançado e a adoção da formulação exata do CVRP aplicada às Regionais com posterior validação e divisão de rotas permitem a otimização do processo de roteirização do CD, reduzindo as distâncias necessária para a distribuição de insumos químicos sólidos.

REFERÊNCIAS

- BALLOU, R. H.; RAHARDJA, H.; SAKAI, N. **Selected country circuitry factors for road travel distance estimation**. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 36, n. 9, 2002.
- BARTHÉLEMY, T.; ROSSI, A.; SEVAUX, M.; SÖRENSEN, K. **Metaheuristic approach for the clustered VRP**. In: EU/MEeting: 10th Anniversary of the Metaheuristics Community- Université de Bretagne Sud, France. 2010.
- GOLDBARG, M.; LUNA, H. **Otimização Combinatória e Programação Linear**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2005.



HE, R.; XU, W.; SUN, J.; ZU, B. **Balanced K-Means Algorithm for Partitioning Areas in LargeScale Vehicle Routing Problem.** In: 2009, NanChang. **2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application.** NanChang: IEEE, 2009.

LIU, L.; LIAO, W. **Optimization and profit distribution in a two-echelon collaborative waste collection routing problem from economic and environmental perspective.** Waste Management, v. 120, 2021.

LUO, J.; CHEN, M.-R. **Multi-phase modified shuffled frog leaping algorithm with extremal optimization for the MDVRP and the MDVRPTW.** Computers & Industrial Engineering, v. 72, n. 1, p. 84-97, 2014.

MACQUEEN, J. B. **Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations.** In: Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley: University of California Press, 1967.

REED, M.; YIANNAKOU, A.; EVERING, R. **An ant colony algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem.** Applied Soft Computing Journal, v. 15, p. 169-176, 2014.

SAHOO, S.; KIM, S.; KIM, B.-I.; KRAAS, B.; POPOV, A. **Routing Optimization for Waste Management.** Interfaces, v. 35, n. 1, p. 24-36, 2005.

SEVAUX, M.; SÖRENSEN, K. **Hamiltonian paths in large clustered routing problems.** In: Proceedings of the EU/MEeting 2008 workshop on Metaheuristics for Logistics and Vehicle Routing, EU/ME. 2008.

TALBI, E.G. **Combining metaheuristics with mathematical programming, constraint programming and machine learning.** 4OR, v. 11, n. 2, 2013.

WANG, Y.; ASSOGBA, K.; LIU, Y.; MA, X.; XU, M.; WANG, Y. **Two-echelon location-routing optimization with time windows based on customer clustering.** Expert Systems with Applications, v. 104, 2018.

WANG, Y.; ZHANG, S.; GUAN, X.; PENG, S.; WANG, H.; LIU, Y.; XU, M. **Collaborative multi-depot logistics network design with time window assignment.** Expert Systems with Applications, v. 140, p. 112910, 2020.