

Roteirização colaborativa de veículos: aplicação na logística militar**Collaborative Vehicle Routing: Application In Military Logistics**

DOI:10.34117/bjdv6n12-372

Recebimento dos originais: 16/11/2020

Aceitação para publicação: 16/12/2020

Newton Carlos de Oliveira Portella

Mestrando

Instituto Militar de Engenharia, Pós-graduação em Engenharia de Transportes

Praça General Tibúrcio, 80 – Urca, Rio de Janeiro-RJ CEP 22290-270

E-mail: newtoncarlos99@gmail.com

Luiz Antônio Silveira Lopes

D. Sc

Instituto Militar de Engenharia, Pós-graduação em Engenharia de Transportes

Praça General Tibúrcio, 80 – Urca, Rio de Janeiro-RJ CEP 22290-270

E-mail: laslopes@ime.eb.br

Orivalde Soares da Silva Júnior

D. Sc

Instituto Militar de Engenharia, Pós-graduação em Engenharia de Transportes

Praça General Tibúrcio, 80 – Urca, Rio de Janeiro-RJ CEP 22290-270

E-mail: orivalde@ime.eb.br

RESUMO

Diante de um cenário em que cada Força Armada planeja e executa seus transportes individualmente, a inserção da roteirização colaborativa nos planejamentos militares visa compartilhar veículos de diferentes Forças a fim de minimizar a distância total percorrida. Neste artigo foi utilizado um modelo unificado de roteirização de veículos que emprega uma metaheurística de busca adaptativa em grande vizinhança para atingir os resultados de roteirização colaborativa com clientes compartilhados. A contribuição deste artigo está na apresentação de uma metodologia de três fases para solução de um problema de roteirização com clientes compartilhados utilizando os problemas de roteirização com um e com múltiplos depósitos. Realizou-se um estudo de caso para roteirização da distribuição de suprimentos militares da Marinha, do Exército e da Aeronáutica. Os resultados apresentam uma redução de 2,45% com uso da roteirização colaborativa por clientes compartilhados quando comparada a roteirização individual.

Palavras chave: logística militar, transportes colaborativos, roteirização de veículos.

ABSTRACT

Faced with a scenario in which each Armed Force plans and executes its transportation individually, the insertion of collaborative routing in military plans aims to share vehicles from different armed forces in order to minimize the total distance traveled. This article was used in a unified vehicle routing model applied to exact methods and a variant of the adaptive large neighborhood search algorithm to obtain the results of collaborative routing with shared customers. The contribution of this article is in the presentation of a three-phase methodology for solving a routing problem with shared customers, using routing problems with multiple depots. Conducted a case study for routing the distribution of

military supplies from the Navy, Army and Air Force. The results presented a reduction of 2,45% with the use of shared collaborative customer routing when compared to an individual routing.

KEYWORDS: military logistics; collaborative transportation; vehicle routing.

1 INTRODUÇÃO

O Problema de Roteirização Colaborativa de Veículos (*Collaborative Vehicle Routing Problem - CVRP*) trata da colaboração entre transportadores que precisam atender os mesmos clientes dentro de um mesmo período de tempo, compartilhando as capacidades de seus veículos para realizar entregas e, portanto, diminuindo a distância total percorrida, o número de veículos empregados e consequentemente o custo do transporte [Fernández *et al.* 2018].

Há muitas variações de VRPs propostas para atender restrições e objetivos distintos e neste sentido, [Erdoğan 2017] apresenta uma formulação matemática unificada. Como produto final, o autor disponibilizou uma planilha eletrônica com um *add-on* que permite entrar com os dados do problema de roteirização, georreferenciar os clientes e depósitos utilizando os endereços, calcular a matriz de distâncias, resolver utilizando a metaheurística de busca adaptativa em grande vizinhança (*Adaptative Large Neighbourhood Search – ALNS*) e visualizar os resultados numericamente e graficamente com um mapa. A planilha permite obter resultados de roteirizações com um único depósito ou com múltiplos depósitos, com ou sem restrições de janelas de tempo entre outras possibilidades.

[Fernández *et al.* 2018] identificou que muitos transportadores atuam em uma mesma área, cada um deles servindo seus próprios clientes, saindo de seus próprios depósitos e utilizando seus próprios veículos. Enquanto alguns clientes demandam serviços exclusivamente para um único transportador, outros clientes demandam para vários transportadores os quais podem ser compartilhados. O Problema de Roteirização de Veículos com Colaboração de Clientes Compartilhados (*Shared Customer Collaboration Vehicle Routing Problem – SCC-VRP*) tem por objetivo explorar os benefícios dos transportadores que podem realizar entregas aos clientes compartilhados em nome dos outros transportadores. O compartilhamento ocorre quando há transferência de demanda de um cliente que pode ser atendido por dois ou mais transportadores que operam de diferentes depósitos. Para serem considerados clientes compartilhados no *SCC-VRP*, os clientes devem estar próximos de tal forma que esse grupo possa ser atendido com uma só parada de entrega e, ainda, haver diminuição do custo total de distribuição. Quando não ocorre o compartilhamento de clientes o *SCC-VRP* torna-se um Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos (*Multi-depot Vehicle Routing Problem – MDVRP*).

O ponto comum entre o modelo de [Fernández *et al.* 2018] e a logística militar é que tratam de problemas muito semelhantes com relação ao planejamento e execução individual dos transportes, quando há possibilidades de diminuir custos por meio do compartilhamento de clientes. As Forças Armadas (FA) estudadas, quando juntas, caracterizam um MDVRP, pois cada uma possui um depósito central, de onde saem os veículos para as entregas, e vários depósitos intermediários para onde se destinam os suprimentos. Uma das semelhanças identificadas é que alguns depósitos intermediários podem se tornar clientes compartilhados por estarem relativamente próximos, podendo resultar em diminuição dos custos de transporte para as três FA. São denominados transportadores a Marinha do Brasil (MB), o Exército Brasileiro (EB) e a Força Aérea Brasileira (FAB) por meio de seus depósitos centrais e, denominados clientes os seus depósitos intermediários.

O objetivo deste artigo é propor uma roteirização colaborativa dos veículos militares da MB, do EB e da FAB com a finalidade de reduzir a distância percorrida. A contribuição neste trabalho está em utilizar o modelo de [Erdoğan 2017] para atingir os resultados da roteirização colaborativa de clientes compartilhados de [Fernández *et al.* 2018].

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma breve revisão de literatura. Na Seção 3 é apresentada a descrição completa do modelo matemático. Na Seção 4 é apresentado o estudo de caso com aplicação na logística militar. Finalmente, na Seção 5 são apresentadas as conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As pesquisas foram realizadas nas bases de dados de indexação ISI Scopus e Web of Science, fontes de dados que contêm as revistas científicas mais atualizadas [Mongeon e Paul-Hus, 2016]. Para a busca, foram utilizadas as seguintes combinações de palavras-chave: “*Collaborative*” AND “*Vehicle Routing*” a fim de direcionar a busca por publicações que tivessem foco no emprego de transportes colaborativos. A pesquisa, aplicada a títulos, resumos e palavras-chave de artigos publicados em revistas internacionais e indexadas, sendo selecionados artigos cuja função-objetivo minimizam os custos, as distâncias percorridas e o número de veículos.

[Krajewska *et al.* 2008] apresentam um trabalho sobre alocação de pedidos e compartilhamento de lucros entre transportadores, sob o ambiente da cooperação horizontal. Os autores combinam problemas de roteirização com teoria dos jogos cooperativa e utilizam heurísticas *Shapley Value* para determinar a alocação mais ajustada dos custos para cada parceiro. O problema de entregas e coletas com janela de tempo em um único depósito é comparado com uma variante colaborativa, modelada com vários depósitos. O objetivo é minimizar a distância total percorrida pelos parceiros envolvidos.

[Masrom *et al.* 2010] abordaram sobre a roteirização de veículos para o sistema de monitoramento de transporte baseado em localização automatizada de veículos. Os autores destacam que a roteirização de veículos tem envolvimento direto com os custos de transportes das empresas e o nível de serviço ofertado. Para que haja redução de custos, o planejamento deve considerar todo o processo de distribuição que principalmente envolve gerenciamento de veículos ao longo das suas rotas. É proposto um algoritmo de predição de tempo de viagem e de chegadas de ônibus que usa informações de sistema de posicionamento global (GPS) em cada veículo. O tipo de colaboração tratada no artigo refere-se à integração de sistemas de localização e de informações como GPS, SMS, GPRS, GIS entre outros. Como conclusão, a integração dos sistemas em um meio colaborativo de redes e informações proporcionou um modelo de VRP mais eficiente quando comparados com outros sem colaboração.

[Vanovermeire *et al.* 2014] investiga as vantagens da colaboração horizontal em um caso de estudo de três empresas belgas nas quais 57% dos pedidos são entregues para clientes compartilhados e mesmo sem explorar todas as oportunidades de melhoria da cadeia de suprimentos, a colaboração diminuiu os custos de transportes em 25,83% . Os autores destacam a estratégia de flexibilidade das empresas, que é a possibilidade de alterar as datas e fracionar as entregas aos clientes a fim de obter a melhor alocação nos veículos resultando em menores custos globais. A cooperação entre operadores, onde há troca de pedidos e compartilhamento de veículos, pode gerar uma desconfiança quanto a correta distribuição dos lucros, uma vez que um operador pode ter sido mais utilizado em comparação aos outros da coalizão, desestimulando a flexibilidade. Nesse sentido, a heurística *Shapley Value* é utilizada como um método de alocação de lucro justo, recompensando o impacto que cada operador tem na colaboração, incentivando a flexibilidade.

[Adenso-Díaz *et al.* 2014] apresentam uma avaliação das economias em transportes que podem ser obtidas com o uso das entregas interligadas entre transportadores fora da cadeia de suprimentos, mas com serviços similares. Os autores apresentam um modelo para avaliar essas economias e, para a sua solução, empregam uma metaheurística *GRASP* que analisa a performance do modelo e o quanto foi obtido em economia com essas entregas conectadas. Como resultados, são confirmados que os custos deste tipo de cooperação diminuem de acordo com o tamanho da parceria e aumentam os ganhos uma vez que é diminuída a distância a ser percorrida pelo veículo de entrega.

[Pérez-Bernabeu *et al.* 2015] apresentam a colaboração horizontal nos transportes rodoviários com reflexos na redução de emissões de gases poluentes. Os autores utilizaram a metaheurística de busca local iterada (*Iterated Local Search – ILS*) e analisam diferentes cenários a fim de quantificar as economias nas rotas utilizadas com a colaboração. São analisados diferentes cenários a fim de quantificar as economias nas rotas utilizadas com a colaboração, utilizando como base modelos de

problemas de roteirização de veículos com vários depósitos para o ambiente colaborativo e problemas de roteirização de veículos capacitados no ambiente não-colaborativo. As economias obtidas levaram em conta a distribuição geográfica dos clientes de acordo com as atribuições dos transportadores.

[Guajardo e Rönnqvist 2016] trazem uma revisão de literatura sobre métodos de alocação de custos nos transportes colaborativos, ou seja, como esses custos devem ser distribuídos entre os entes participantes. Os autores selecionaram 55 artigos científicos usando as palavras de busca “*cost allocation*” com “*transportation*”, “*travelling*” ou “*routing*”. Os artigos selecionados foram classificados de acordo com cinco problemas de transportes colaborativos: planejamento de transporte; caixeiro viajante; roteirização de veículos; distribuição conjunta; e inventário. Adicionalmente, os autores apresentam um sexto problema de transporte que está relacionado com o compartilhamento da infraestrutura de transporte como estradas e pontes. Além dos métodos tradicionalmente utilizados, os autores destacam a utilização de conceitos cooperativos de teoria dos jogos, com a utilização de estratégias mistas, para a solução de problemas de colaboração.

[Chen 2016] considera a colaboração de transportadores para os casos em que não há preenchimento completo de carga nos veículos (*Less-than-truckload* – *LTL*), onde ocorrem terceirizações de pedidos por se tratar de demandas com pouca ou sem lucratividade. Nesses casos as demandas são levadas a leilão para serem oferecidas a outros transportadores interessados. O autor considera que o transportador divide suas demandas em duas partes, sendo uma que pode ser transferida a outro operador e outra que será atendida por seus próprios veículos. A colaboração entre transportadores é caracterizada pela troca de parte de seus pedidos durante os leilões de frete. O mecanismo de realocação de demandas chamado de *Combinatorial Clock-Proxy Exchange* - *CCPE* é utilizado nos leilões de frete com a finalidade de descobrir os preços por meio de relaxação Lagrangeana na primeira fase (*clock*) e de gerar lances para a segunda fase (*proxy*), seu objetivo é otimizar a realocação da parte da demanda que foi terceirizada de forma que o lucro total seja maximizado.

[Ouhader e El Kyal 2017] tratam da combinação entre as decisões de localização de facilidades e de roteirização de veículos urbanos sob o foco da colaboração horizontal e investigam a economia gerada pelo emprego da colaboração nos fretes de cargas. Os autores estudam o problema nos níveis estratégico, tático e operacional, utilizando da análise em duas etapas. O objetivo é minimizar os custos de transporte e as emissões de CO₂ utilizando o método *e-constraints* bem como de vários exemplos conhecidos para construir a distribuição de produtos de forma mais próxima à realidade. Como resultados, foi feita uma comparação entre os cenários de um ambiente colaborativo e outro não-colaborativo, ficando evidente que no primeiro há redução de custos, de emissões de CO₂, da

quantidade de veículos utilizados e das distâncias percorridas por ter sido feito um melhor carregamento dos veículos.

O trabalho de [Gansterer e Hartl 2018] traz uma ampla revisão bibliográfica direcionada à roteirização colaborativa de veículos, elencando os métodos de solução exatos, metaheurísticos e *math*-heurísticos para o VRP (*Vehicle Routing Problem*), IRP (*Inventory Routing Problem*), ARP (*Arc Routing Problem*), entre outros. Termos semelhantes a colaboração tais como cooperação, coalisão e aliança podem ser utilizados para buscas na literatura, no entanto há um consenso de que o termo colaboração se refere à existência de ligações mais fortes entre os operadores.

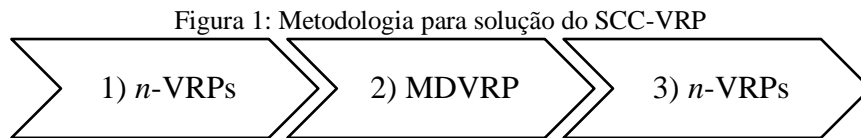
[Wang *et al.* 2018] apresentam o problema de roteirização colaborativa de veículos com múltiplos centros e com coletas e entregas simultâneas (*Collaborative multiple Centers Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup - CMCVRPSDP*) com o objetivo de minimizar custos operacionais e diminuir a quantidade de veículos utilizados na rede. Os autores propuseram um algoritmo heurístico híbrido que adequadamente combina *K-means* e *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)*. Comparações entre o NSGA-II tradicional e algoritmo *Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)* indicaram melhores resultados para o híbrido NSGA-II (HNSA-II) quando se observam os valores da função objetivo. Como resultados verificou-se que a otimização com o CMCVRPSDP reduziu os transportes de itinerário longo e melhorou a taxa de carregamento dos veículos.

[Fernández *et al.* 2018] apresentam um novo problema de roteirização de veículos chamado de Colaboração de Clientes Compartilhados (*Shared Customer Collaboration Vehicle Routing Problem – SCC-VRP*) no qual identificam uma colaboração entre transportadores que estão no mesmo nível da cadeia de suprimentos, conhecido como colaboração horizontal. A função objetivo visa minimizar os custos de transportes levando em consideração as distâncias percorridas pelos transportadores nas entregas aos clientes. O modelo identifica quais são os clientes compartilhados utilizando três critérios, o primeiro é que só podem ser compartilhados os clientes que são servidos por mais de um transportador; o segundo é o de proximidade (os clientes devem estar próximos a uma distância tal que as entregas destinadas a esses clientes possam ser feitas com somente uma parada do veículo); e o terceiro é o de redução de custo de entregas (o custo de entrega para os clientes compartilhados deve ser menor do que o custo individual de cada transportador para aquele cliente). Quando essas três características são identificadas, as demandas dos clientes compartilhados são fundidas em uma só, tornando-se um grupo único de clientes. Os autores expõem duas formulações para solução do SCC-VRP, sendo uma baseada em veículos e outra formulação baseada em cargas, sendo esta última a que foi utilizada como referência para adaptação ao modelo de [Erdoğan 2017].

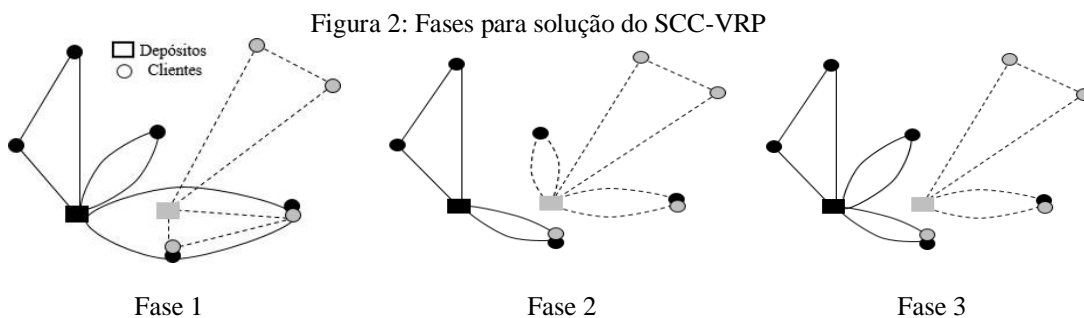
3 METODOLOGIA

O SCC-VRP pode ser visto como uma variante do problema de roteirização de veículos com múltiplos depósitos no qual a demanda total de cada cliente pode ser dividida entre as rotas de diferentes transportadores, mas se diferencia no aspecto de que essa divisão não pode ser de forma arbitrária. Somente as quantidades correspondentes às demandas individuais (por exemplo, demandas do cliente i para o transportador r) podem ser atendidas por diferentes rotas, mas deve ser escolhida uma das rotas. Ou seja, se a demanda de um cliente for compartilhada com outro transportador, ela deverá ser integralmente entregue por aquele transportador.

Neste artigo realiza-se uma adaptação do modelo proposto por [Fernández *et al.* 2018] para resolver o SCC-VRP com base no modelo unificado de [Erdoğan 2017] para solução dos problemas de roteirização com um depósito (VRP) e com múltiplos depósitos (MDVRP). Para tanto, o SCC-VRP é resolvido em três fases, conforme ilustra a Figura 1.



Na fase 1 são resolvidos n -VRPs, onde n representa o número de transportadores, sendo que cada um possui um único depósito, frota de veículos e clientes. O objetivo desta fase é obter as rotas para os veículos de cada transportador e identificar as distâncias percorridas para realizar a distribuição sem colaboração entre os transportadores. Na fase 2 é resolvido um MDVRP com todos os transportadores a fim de identificar a melhor alocação entre clientes e transportadores numa solução global otimizada. Os clientes compartilhados são aqueles que estão próximos entre si, com um limite de distância máxima md , que são de diferentes transportadores e que foram alocados a um mesmo transportador ao se resolver o MDVRP. Na fase 3, são resolvidos n -VRPs, alocando os clientes compartilhados a cada transportador para obter a roteirização final, equivalente ao SCC-VRP. A Figura 2 ilustra as fases de solução do SCC-VRP.



Para formalizar os problemas resolvidos em cada uma das fases, apresenta-se a seguir o modelo matemático de programação linear inteira proposto por [Erdogan 2017], o qual é resolvido pelo autor utilizando a metaheurística ALNS. Primeiramente se estende o grafo $G=(V,A)$ à rede direcionada completa na qual será resolvido o VRP. Sendo V os vértices e A as arestas, define-se V_D como o conjunto de vértices que contêm os depósitos, V_C como o conjunto de vértices que contêm os clientes, V_M como o conjunto de vértices que contêm os clientes que devem ser visitados e $V = V_D \cup V_C$. Define-se ainda $V_M \subseteq V_C$ como o conjunto de clientes que devem ser visitados e K como o conjunto de veículos.

Define-se como p_i o lucro de atender a um cliente $i \in V_C$, como q_i a quantidade coletada para o cliente, como \hat{q} a quantidade entregue para o cliente e como s_i o tempo de serviço necessário para o cliente. Foi também definido como $[a_i, b_i]$ a janela de tempo para atender o cliente, havendo também uma janela de tempo para cada depósito.

Para um veículo $k \in K$, define-se como o_k o depósito de origem para o veículo, como τ^k o tempo de início de trabalho para o veículo, como f^k o custo fixo de uso de um veículo, como Q^k a capacidade de um veículo, como D^k a distância limite, como \hat{b} o tempo limite de condução, como W^k o tempo limite de trabalho, como r^k o veículo que retorna ao depósito. Conforme o arco $(i, j) \in A$ percorrido, foi também definido como d_{ij} a distância percorrida e como \hat{d}_j a duração da condução. Por fim, para cada veículo $k \in K$, define-se como c^k_{ij} custo da viagem no arco (i, j) .

Os parâmetros relacionados com as restrições de operação estão definidos, sendo Ω que terá o valor igual a 1 se o veículo deve retornar para seu depósito específico e valor 0, caso contrário. Da mesma forma, definimos β que terá valor igual a 1 se há uma restrição de carga de retorno e valor 0, caso contrário. Adicionalmente, define-se Θ que terá valor igual a 1 se a janela de tempo pode ser violada ao custo de uma penalidade Π por unidade de tempo e valor 0, caso contrário.

As variáveis de decisão são x^k_{ij} que terá valor 1 se o veículo k percorrer o arco (i, j) e valor 0, caso contrário e, y^k_i que terá valor 1 se o veículo k visita e atende o vértice i e terá valor 0, caso contrário. A quantidade de mercadoria coletada e entregue, transportada pelo veículo k no arco (i, j) é definida como w^k_{ij} e z^k_{ij} , respectivamente. Também foram definidas como t^k_i a hora em que o veículo k chega ao vértice i e como v^k_i a quantidade violada da janela de tempo no vértice i . A formulação do VRP unificado é a seguinte:

$$Max \sum_{i \in V_C} \sum_{k \in K} p_i y^k_i - \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c^k_{ij} x^k_{ij} - \sum_{j \in V_C} \sum_{k \in K} f^k x^k_{o^k,j} - \Pi \sum_{i \in V} v_i \tag{1}$$

s.a

$$\sum_{k \in K} y_i^k = 1 \quad \forall i \in V_M \tag{2}$$

$$\tag{3}$$

$$\sum_{k \in K} y_i^k \leq 1 \quad \forall i \in V_C \setminus V_M$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij}^k \leq \sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ji}^k \quad \forall j \in V_C, k \in K \tag{4}$$

$$\sum_{p \in S, q \in V \setminus S} x_{pq}^k \geq y_i^k \quad \forall i \in V_C, k \in K, S \subset V : o^k \in S, i \in V \setminus S \tag{5}$$

$$\sum_{p \in S, q \in V \setminus S} x_{pq}^k \geq \Omega y_i^k \quad \forall i \in V_C, k \in K, S \subset V : i \in S, r^k \in V \setminus S \tag{6}$$

$$\sum_{j \in V_C} x_{o^k, j}^k \leq 1 \quad \forall k \in K \tag{7}$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq 1 - \beta \quad \forall (i, j) \in A : q_i > 0 \text{ e } \hat{q} > 0 \tag{8}$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} w_{ij}^k - \sum_{j \in V \setminus \{i\}} w_{ji}^k = q_i y_i^k \quad \forall i \in V_C, k \in K \tag{9}$$

$$\sum_{i \in V_C} w_{i, r^k}^k = \sum_{j \in V_C} q_j y_j^k \quad \forall k \in K \tag{10}$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} z_{ji}^k - \sum_{j \in V \setminus \{i\}} z_{ij}^k = \hat{q} y_i^k \quad \forall i \in V_C, k \in K \tag{11}$$

$$\sum_{i \in V_C} z_{o^k, j}^k = \sum_{i \in V_C} \hat{q} y_i^k \quad \forall k \in K \tag{12}$$

$$t_i^k + (\hat{d}_j + s_i)x_{ij}^k - W^k(1 - x_{ij}^k) \leq t_j^k \quad \forall (i, j) \in A: j \in V_c, k \in K \quad (13)$$

$$a_i \leq t_i^k \leq b_i - s_i + v_i \quad \forall i \in V_c, k \in K \quad (14)$$

$$v_i \leq M \cdot \Theta \quad \forall i \in V_c \quad (15)$$

$$t_{o^k}^k = \tau^k \quad \forall k \in K \quad (16)$$

$$t_i^k + (s_i + \hat{d}_j)x_{i,r}^k \leq b_{r,k} + v_{r,k} + M(1 - \Omega) \quad \forall (i, j) \in A: j \in V_c, k \in K \quad (17)$$

$$w_{ij}^k + z_{ij}^k \leq Q^k x_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} d_{ij} x_{ij}^k \leq D^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (19)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \hat{d}_j x_{ij}^k \leq \hat{D} \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (20)$$

$$\sum_{i \in V_c} s_i y_i^k + \sum_{(i,j) \in A} \hat{d}_j x_{ij}^k \leq W^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (21)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall i \in V_c, k \in K \quad (22)$$

$$y_i^k \in \{0,1\} \quad \forall i \in V_c, k \in K \quad (23)$$

$$v_i \geq 0 \quad \forall i \in V_c \quad (24)$$

$$w_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (25)$$

$$z_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (26)$$

A função objetivo (1) maximiza o lucro total coletado ao visitar os clientes menos o custo de viagem dos veículos, o custo fixo do uso de veículos e a penalidade por violar as janelas de tempo. As restrições (2) garantem que todos os clientes sejam visitados no máximo uma vez. As restrições (3) impõem uma visita aos clientes que devem ser visitados. As restrições (4) são uma forma fraca das restrições de conservação de fluxo, que requerem uma entrada se houver uma saída. As restrições (5) fornecem a conectividade entre o depósito de origem do veículo k e os clientes visitados por este veículo. As restrições (6) determinam que o veículo retorne ao depósito, se for necessário. As restrições (7) estabelecem que cada veículo pode ser usado no máximo uma vez, enquanto o retorno é imposto pelas restrições (8). As restrições a seguir definem os requisitos do cliente. A conservação do fluxo para a mercadoria de coleta é fornecida pelas restrições (9) e (10). Da mesma forma, a conservação do fluxo para a mercadoria fornecida é estabelecida pelas restrições (11) e (12). A restrição (13) é formulada com base nas restrições de eliminação de subrotas de Miller–Tucker–Zemlin e fornecem a estrutura para as janelas de tempo. Os limites inferior e superior da janela de tempo para cada cliente e a variável a ser considerada pela violação são apresentados nas restrições (14) e (15). O conjunto final de restrições declara as restrições relacionadas aos veículos. As restrições (16) e (17) definem o início do tempo de trabalho do veículo k e garantem que o veículo retorne ao seu depósito no prazo, se for necessário. As restrições (18) proíbem a violação das capacidades do veículo. As restrições (19) – (21) indicam a distância máxima, tempo máximo de condução e tempo máximo de trabalho para cada veículo. Por fim, as restrições (22) – (26) são restrições de integralidade e não-negatividade.

4 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO NA LOGÍSTICA MILITAR

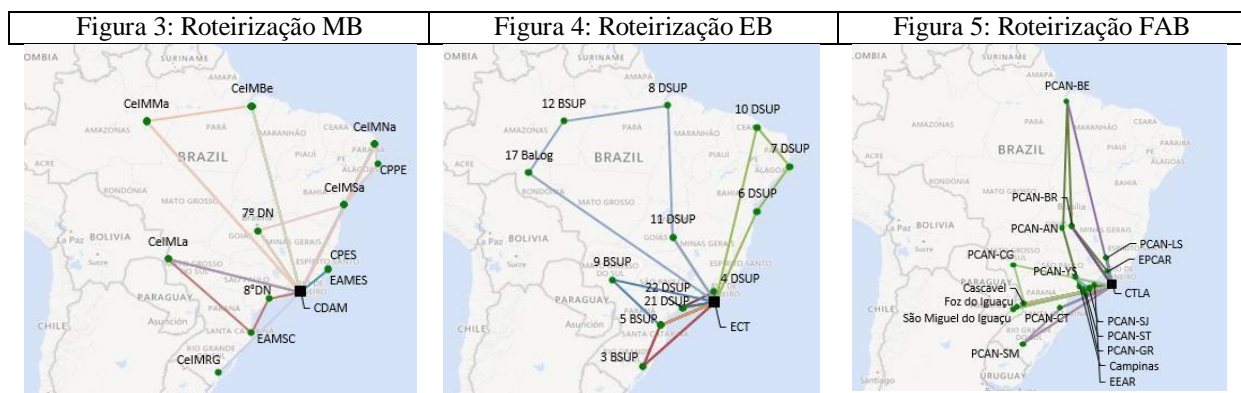
A aplicação do problema de roteirização colaborativa surgiu a partir do conhecimento de que o Ministério da Defesa (MD) busca uma maior integração na logística de transportes, visando otimizar as rotas e diminuir a distância percorrida pelos veículos militares. As FA planejam seus transportes de forma individual sem, no entanto, aproveitar as capacidades de transporte de forma recíproca. É exatamente nesse aspecto que cresce de importância a roteirização colaborativa a fim de minimizar as distâncias percorridas pelo compartilhamento de veículos e cargas. A maioria das pesquisas sobre o problema de roteirização colaborativa de veículos tem aplicação em frotas civis, sendo assunto pouco explorado por pesquisadores na vertente militar. Este estudo cresce de importância uma vez que o emprego das FA tem se mostrado mais frequente nos casos de operações de Garantia da Lei e da Ordem, de calamidade pública, de ajuda humanitária e, recentemente, de pandemias.

O EB e a FAB contam com Organizações Militares Executoras de Transportes (OMET) com frota própria dedicada à execução dos transportes militares nacionais no âmbito de cada FA, concentradas no Rio de Janeiro e que atendem destinos comuns ou relativamente próximos. A OMET

do EB é o Estabelecimento Central de Transportes (ECT) e a da FAB é o Centro de Transportes Logísticos da Aeronáutica (CTLA). A Marinha do Brasil (MB) emprega uma doutrina diferenciada na qual terceiriza a maioria de seus transportes para destinos fora do Rio de Janeiro, no entanto possui uma OMET que controla toda a atividade de transporte de suprimentos que é o Centro de Distribuição e Operações Aduaneiras da Marinha (CDAM). As três OMET serão consideradas neste trabalho como os depósitos centrais de onde saem e devem retornar todos os veículos. Esse modelo de solução somente é possível porque os depósitos centrais estão bem próximos, sendo a maior distância entre dois depósitos de 11,5 km e a menor de 6,6 Km, facilitando as coletas no depósito do transportador parceiro. Os depósitos intermediários, que são os clientes, são nominados de DSUP e BSUP para o EB, de CeIM para a MB e de PCAN para a FAB. Quando não há um depósito intermediário próximo a uma unidade militar, as entregas são feitas diretamente na unidade e neste caso foram utilizados os nomes da unidade militar ou da cidade para indicar o cliente.

Neste estudo de caso foi identificado que a colaboração é do tipo horizontal. Segundo [Pomponi *et al.* 2013] a colaboração horizontal é a que ocorre entre transportadores que estão no mesmo nível da cadeia de suprimentos, podendo haver compartilhamento de pedidos (parte dos pedidos é atendido por um transportador parceiro) ou trocas de pedidos (um parceiro atende integralmente a demanda de outro transportador). O objetivo é alcançar a melhoria mútua na execução dos trabalhos por meio de um relacionamento entre transportadores. O caso militar com 3 depósitos centrais e 42 depósitos intermediários da MB (12), do EB (13) e da FAB (17), será solucionado utilizando a planilha de [Erdoğan 2017] adaptado ao modelo de [Fernández *et al.* 2018] em três fases.

Os veículos são capacitados e a frota heterogênea, mas com 1 tipo de veículo de igual capacidade (24.000 Kg) para as 3 Forças. Os dados de transporte foram obtidos com os órgãos gestores de cada FA, consolidando as cargas transportadas nos meses de maio, junho e julho de 2019. Na primeira fase foi realizado um VRP para cada transportador e seus respectivos clientes. Nas figuras 3, 4 e 5 observam-se as rotas utilizadas para atender as demandas dos respectivos clientes.



Como o objetivo deste estudo de caso é verificar se existem ganhos com a roteirização colaborativa entre as 3 Forças, foram assumidas algumas hipóteses simplificadoras: foram considerados valores nulos para os custos fixos de transporte, para os lucros e para as penalizações de janela de tempo pelo fato de os transportes militares não visarem lucro, as unidades militares estarem integralmente disponíveis e os custos fixos serem considerados equivalentes para os três transportadores, respectivamente. Ademais, foi considerado o custo por quilômetro percorrido como R\$ 1,00, para que a distância total seja igual ao custo total. Foram utilizados alguns critérios relativos à carga: considerou-se a unidade de medida da carga em quilos; na consolidação das cargas por clientes, foi considerada a maior carga com peso de 24.000 Kg, devido à capacidade comum de carga dos veículos entre os três transportadores. Cargas pequenas, menores que 24.000 Kg, pertencentes a um mesmo cliente, foram agregadas a fim de não ultrapassar a capacidade de clientes da planilha que tem um número máximo de 200. As cargas superiores a 24.000 kg são tratadas de duas formas: se ultrapassar em até 2.400 Kg (10%) da capacidade do veículo comum entre as 3 Forças não haverá divisão da carga para outro veículo; caso contrário será dividida em partes de 24.000 Kg identificando-se cada parte dividida por um número sequencial após o nome do cliente, por exemplo PCAN-CT e PCAN-CT 1. Aplicados esses critérios de carga, formaram-se 114 clientes somando-se as três Forças. Após a roteirização individual (primeira fase), apontam-se as distâncias percorridas pelos veículos de cada Força, que saem e retornam ao seu respectivo depósito, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Distâncias totais percorridas por cada Força

Força	Distância percorrida (km)
MB	135.377,9
EB	45.221,8
FAB	90.626,8
Distância total percorrida (km) 271.226,5	

Para a segunda fase foi realizado um MDVRP com todos os clientes juntos e os três depósitos centrais do EB, MB e FAB. O objetivo dessa simulação é visualizar os potenciais clientes compartilhados, pois os resultados apontarão as melhores alocações transportadores-clientes com a menor distância percorrida. Cada cliente escolhido para formar os grupos de clientes compartilhados podem ser atendidos por mais de um transportador, estão localizados a uma distância máxima escolhida de 30 Km ($md \leq 30$) e essa alocação apresenta redução da distância percorrida. A Tabela 2 consolida os resultados do MDVRP com as distâncias entre os clientes compartilhados (md), os grupos formados e as distâncias totais percorridas pelos veículos dos três transportadores. A rota do veículo EB V72 foi dividida em duas partes V72 e V72-1 por englobar dois pares de clientes compartilháveis que se

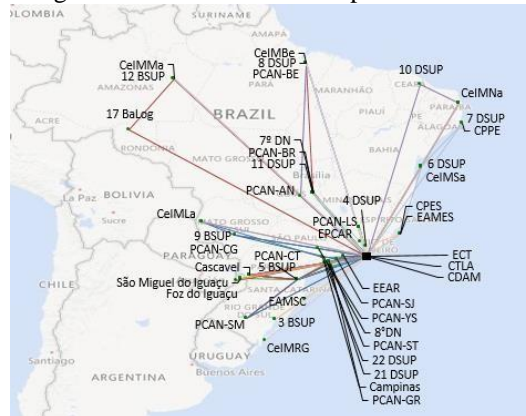
encontram destacados em negrito. Por tratar-se de uma única rota, a distância percorrida não foi alterada e para isso foi inserido o valor zero na rota de V72-1.

Tabela 2: Grupos de clientes compartilhados e distâncias percorridas no MDVRP

Veículo	Rota	md	Grupos	Distância
V25	CDAM→ 12 BSUP → CeIMMa 3 → 17 BaLog → CDAM	13,6	G1	8527
V36	CTLA→ PCAN-CT→ 5 BSUP 5→ CTLA	6,3	G2	1674,2
V43	CTLA→ PCAN-CT 1→ 5 BSUP 7→ CTLA	6,3	G3	1674,2
V72	ECT→ CPPE → 7 DSUP → CeIMSa 5→ 6 DSUP→ CPES → ECT	4,6	G4	4709
V72-1	ECT→ CPPE→ 7 DSUP→ CeIMSa 5 → 6 DSUP → CPES→ ECT	29,6	G5	0
V76	ECT→ EPCAR→ PCAN-BR 6→ 7º DN 1 → 11 DSUP → ECT	7,1	G6	2345,4
Demais veículos sem clientes compartilháveis				224.597,5
Distância total percorrida pelos veículos do EB, MB e FAB (km)				243.527,3

A Figura 6 ilustra o resultado das rotas para o MDVRP sem aplicação do SCC-VRP.

Figura 6: Resultado das rotas para o MDVRP



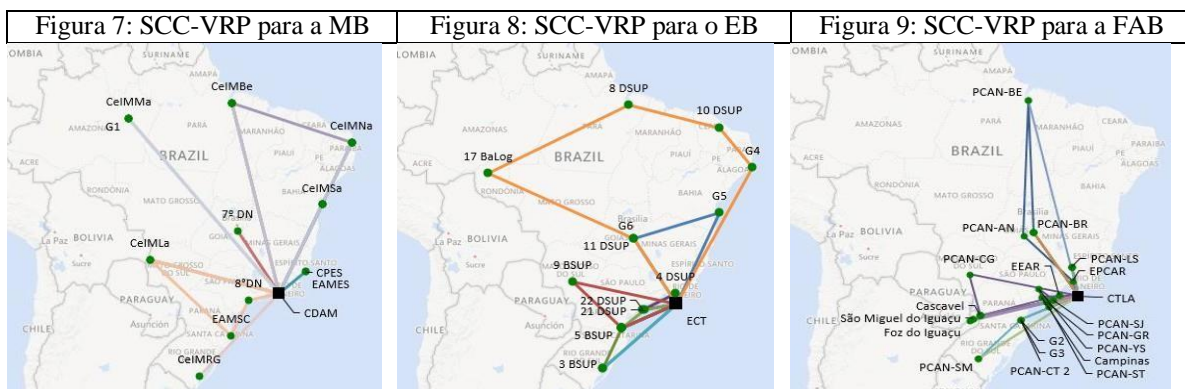
Com a identificação dos clientes compartilhados na segunda fase, alocados aos seus respectivos transportadores, a terceira fase consiste em realizar uma última roteirização para cada transportador (MB, EB e FAB) unindo os respectivos clientes com os grupos de clientes compartilhados e suas demandas. Assim, interpretando a primeira linha de clientes da Tabela 2, as demandas dos clientes 12 BSUP e CeIMMa 3 formarão o grupo G1 e serão atribuídas ao transportador CDAM que por ser da Marinha efetuará a entrega no depósito intermediário da Marinha CeIMMa 3.

A Tabela 3. apresenta os resultados das distâncias percorridas no SCC-VRP pela MB, pelo EB e pela FAB.

Tabela 3. Distâncias percorridas pelo EB, MB e FAB para o SCC-VRP

Transportador	Distância total
MB	134.869,6
EB	39.225,9
FAB	90.486,9
Distância total percorrida pelos veículos do EB, MB e FAB (km)	264.582,4

As Figuras 7, 8 e 9 ilustram as roteirizações finais com o SCC-VRP para a MB, EB e FAB, respectivamente.



Na primeira fase, onde são realizadas as roteirizações individuais, a distância total das rotas da MB, EB e FAB para atender todos os clientes foi de 271.226,5 km. Na segunda fase, onde foi realizada a roteirização com múltiplos depósitos, a distância total das rotas das três Forças foi de 243.527,3 km, portanto menor que a soma das distâncias individuais. Finalmente, na terceira fase são obtidas as rotas para cada Força, mas agora com clientes compartilhados, e a distância total das rotas foi de 264.582,4 km, portanto, 2,45% menor que a roteirização não-colaborativa, no período de maio a julho de 2019, confirmando sua vantagem.

5 CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou uma forma de adaptar o modelo de roteirização com um e múltiplos depósitos para simular os resultados do SCC-VRP. Os resultados mostram que a distância total da variante do VRP com clientes compartilhados é menor que a soma das distâncias individualizadas da MB do EB e da FAB, apresentando-se como uma metodologia viável para a identificação e roteirização de clientes compartilháveis entre as FA.

A utilização da planilha eletrônica, por sua característica de possibilitar a unificação de vários tipos de VRP e configurá-los, mostrou-se uma ferramenta versátil para a solução do SCC-VRP, apontando as distâncias percorridas pelos veículos nas roteirizações simples e com múltiplos depósitos.

Por meio da adaptação das planilhas ao SCC-VRP, foi possível identificar resultados de colaboração entre as Forças Armadas bem como apontar uma redução da distância total percorrida em 2,45 % para esse caso estudado e considerando o período de maio a julho de 2019.

Finalmente, no contexto do Ministério da Defesa e das FA estudadas, o SCC-VRP se demonstra como excelente opção por estar alinhado com a realidade da distribuição de suprimentos militares, particularmente com relação a não divisão da demanda individual de um cliente entre vários transportadores, facilitando o controle dos suprimentos quando somente um transportador executa a demanda.

REFERÊNCIAS

- Adenso-Díaz, B., Lozano, S., Garcia-Carbajal, S., e Smith-Miles, K. (2014) Assessing partnership savings in horizontal cooperation by planning linked deliveries. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 66, 268–279. doi:10.1016/j.tra.2014.05.013
- Chen, H. (2016) Combinatorial clock-proxy exchange for carrier collaboration in less than truck load transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 91, 152–172. doi:10.1016/j.tre.2016.04.008
- Erdoğan, G. (2017) An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems. *Computers & Operations Research*, 84, 62–72. doi:10.1016/j.cor.2017.02.022
- Fernández, E., Roca-Riu, M., e Speranza, M. G. (2018) The Shared Customer Collaboration Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 265(3), 1078–1093. doi:10.1016/j.ejor.2017.08.051
- Gansterer, M., e Hartl, R. F. (2018) Collaborative vehicle routing: A survey. *European Journal of Operational Research*, 268(1), 1–12. doi:10.1016/j.ejor.2017.10.023
- Guajardo, M., e Rönnqvist, M. (2016) A review on cost allocation methods in collaborative transportation: M. Guajardo and M. Rönnqvist. *International Transactions in Operational Research*, 23(3), 371–392. doi:10.1111/itor.12205
- Krajewska, M. A., Kopfer, H., Laporte, G., Ropke, S., e Zaccour, G. (2008) Horizontal cooperation among freight carriers: request allocation and profit sharing. *Journal of the Operational Research Society*, 59(11), 1483–1491. doi:10.1057/palgrave.jors.2602489
- Masrom, S., Abidin, S. Z. Z., Hashimah, P. N., e Rahman, A. S. A. (2010) Providing flexibility in the Vehicle Route Optimization for the AVL based Transport Monitoring System., 9(5), 11.
- Mongeon, P., e Paul-Hus, A. (2016) The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. *Scientometrics*, 106(1), 213–228. doi:10.1007/s11192-015-1765-5
- Ouhader, H., e El Kyal, M. (2017) Combining Facility Location and Routing Decisions in Sustainable Urban Freight Distribution under Horizontal Collaboration: How Can Shippers Be Benefited? *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 1–18. doi:10.1155/2017/8687515
- Pérez-Bernabeu, E., Juan, A. A., Faulin, J., e Barrios, B. B. (2015) Horizontal cooperation in road transportation: a case illustrating savings in distances and greenhouse gas emissions. *International Transactions in Operational Research*, 22(3), 585–606. doi:10.1111/itor.12130
- Pomponi, F., Fratocchi, L., Tafuri, S. R., e Palumbo, M. ([s.d.]) HORIZONTAL COLLABORATION IN LOGISTICS: A COMPREHENSIVE FRAMEWORK., 13.

Vanovermeire, C., Sörensen, K., Van Breedam, A., Vannieuwenhuyse, B., e Verstrepen, S. (2014) Horizontal logistics collaboration: decreasing costs through flexibility and an adequate cost allocation strategy. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 17(4), 339–355. doi:10.1080/13675567.2013.865719

Wang, Y., Zhang, J., Assogba, K., Liu, Y., Xu, M., e Wang, Y. (2018) Collaboration and transportation resource sharing in multiple centers vehicle routing optimization with delivery and pickup. *Knowledge-Based Systems*, 160, 296–310. doi:10.1016/j.knosys.2018.07.024