

OTIMIZAÇÃO PARA ARRUMAÇÃO DE CARGA EM VEÍCULOS UTILIZANDO LAYOUT DE ALMOXARIFADO E ROTAMENTO

Gabriel Lorenzoni Benz¹

¹Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)

¹Rodovia ES-010 - Km 6,5 – 29173-087 – Serra-ES – Brasil
glbenz@gmail.com

Leandro Colombi Resendo¹

leandro@ifes.edu.br

RESUMO

As atividades de logística representam papel importante nas empresas de comércio eletrônico, pois o sucesso da empresa está ligado à satisfação dos clientes e aos custos de entrega. Este artigo propõe dois modelos de programação linear inteira, um para arrumação da carga e roteamento dos veículos, e outro para re-roteamento no caso de falhas na entrega. No modelo proposto para o planejamento da entrega, chamado de *Assignment for Warehouse and Vehicle Routing Problem*, AW-VRP, a arrumação da carga no veículo é tratada como almoxarifado. Já o segundo modelo proposto, chamado de R-VRP, é utilizado para re-roteamento em situações em que o cliente não recebe o produto na primeira visita. Neste caso, o veículo deve fazer mais uma tentativa pelo menos 2 horas após a primeira. Os testes computacionais foram realizados com dados reais da empresa de *e-commerce* Wine.com.br.

PALAVRAS CHAVE. VLP, VRP, logística para comércio eletrônico.

ABSTRACT

Logistics activities represent an important role in e-commerce companies, because company's success is linked to customer satisfaction and to shipping costs. This article proposes two models of integer linear programming, one for vehicles routing and to determine the best way for carrying goods inside the vehicles and, the other, for re-routing in case of failure in delivery. In the first model, called *Assignment for Warehouse and Vehicle Routing Problem*, AW-VRP, the vehicle is treated as warehouse. The second model, called R-VRP, is used to perform the re-routing in situations where the customer is not able to receive the product at the first visit (due to customers' absence, for example). In this case, the vehicle should make another attempt at least 2 hours after the first one. The tests were made with real data from the e-commerce company Wine.com.br.

KEYWORDS. VLP, VRP, e-commerce logistics.

1. Introdução

Apesar do ritmo menos acelerado, as vendas no comércio eletrônico (*e-commerce*) em 2015 no Brasil mantiveram a ascensão e, novamente, apresentaram crescimento. Segundo pesquisa apresentada na 33^a edição do Relatório [Webshoppers 2016], realizado pela E-bit, empresa referência nacional em informações sobre e-commerce, o faturamento do comércio eletrônico foi de R\$ 41,3 bilhões. O número representa um crescimento nominal de 15,3%, em relação a 2014, quando as vendas somaram um total de R\$ 35,8 bilhões.

No mesmo relatório, pesquisas apontam que os principais fatores que fariam com que os clientes passassem a comprar mais produtos e de forma mais frequente são: (1) ter um bom serviço de rastreamento do pedido (63%); (2) agilidade na entrega (61%); (3) cumprir o prazo de entrega (59%); (4) mais opções de frete (48%); (5) poder receber o produto rapidamente (no mesmo dia ou dia seguinte) (46%); e (6) transporte do produto com mais cuidado (não amassar / rasgar) (38%). Por outro lado, dentre os motivos que deixam os clientes mais desconfortáveis em uma compra online, estão: (1) frete alto (67%); (2) atrasos na entrega ou demora para entregar (46%); e (3) obrigatoriamente ter sempre alguém para receber (28%). Esses dados sugerem que planejar e otimizar atividades de transporte de mercadoria são essenciais para empresas do ramo de comércio eletrônico, já que muitas vezes representam uma parcela significativa do custo dos pedidos e estão diretamente ligados à satisfação dos clientes.

Considerando especificamente o nível operacional dos serviços de transporte, há dois aspectos fundamentais de otimização que têm sido intensivamente estudados nos últimos 50 anos [Iori e Martello 2013]: determinar a rota ótima para entregar mercadorias e definir a melhor maneira de carregar tais mercadorias dentro dos veículos utilizados no transporte.

1.1. Descrição do Problema

Este artigo aborda um caso real, propondo um modelo matemático que visa otimizar a logística de transporte de pedidos da empresa de *e-commerce* de bebidas Wine.com.br, tanto em relação à arrumação das mercadorias dentro dos veículos de transporte, quanto à otimização das rotas feitas pelos caminhões. Foram analisados os pedidos realizados na loja *online* durante a primeira semana do mês de abril de 2016, com destino às cidades da região metropolitana de Vitória - ES (Vitória, Vila Velha, Serra, Viana e Cariacica).

Para essas cidades, há uma frota disponível de 5 caminhões climatizados, equipados em seu interior com 2 estantes com 4 prateleiras cada, que ficam fixadas às laterais do caminhão, conforme mostra a Figura 1. Portanto, a arrumação de carga dentro do caminhão não segue o modelo clássico, mas sim uma organização de almoxarifado, já que o funcionário responsável pela entrega tem livre acesso a todos os produtos (neste caso, pedidos) no interior do veículo. Dessa forma, não haveria uma necessidade de arrumar a carga para a ordem de entrega dos clientes. Esta condição não é usual para o problema de arrumação de carga e roteamento, sendo o tratamento dessa especificidade umas das contribuições deste trabalho.

Contudo, por exigência da empresa, buscando eficiência no carregamento e descarregamento dos pedidos, a carga deve ser organizada de forma a reduzir tanto o tempo de permanência quanto o deslocamento do funcionário no interior do veículo, já que os caminhões são climatizados e as entregas devem ser feitas no menor tempo possível. Logo, a arrumação deve ser feita de modo que os pedidos fiquem localizados o mais próximo possível da porta.

Dentro dos caminhões, os pedidos são organizados em caixas padronizadas de três tamanhos diferentes, que comportam 2 (220 cm x 120 cm x 336 cm), 4 (220 cm x 220 cm x 336 cm) ou 6 garrafas (320 cm x 220 cm x 338 cm), como ilustra a Figura 2.

Portanto, o modelo proposto neste artigo para o planejamento da entrega pode ser dividido em 3 etapas, tendo como objetivos: (1) minimizar o número de veículos utilizados para o transporte; (2) otimizar a arrumação da carga no interior dos veículos; e (3) minimizar a distância percorrida.

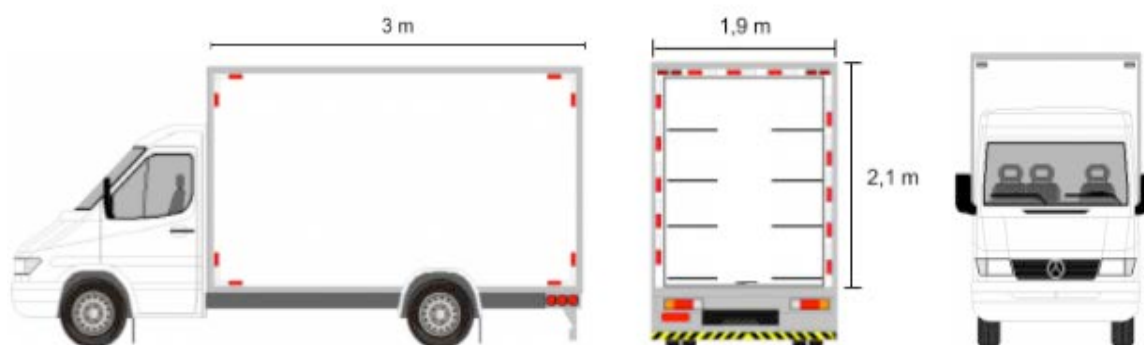


Figura 1 – Caminhões da frota, com as dimensões do baú.

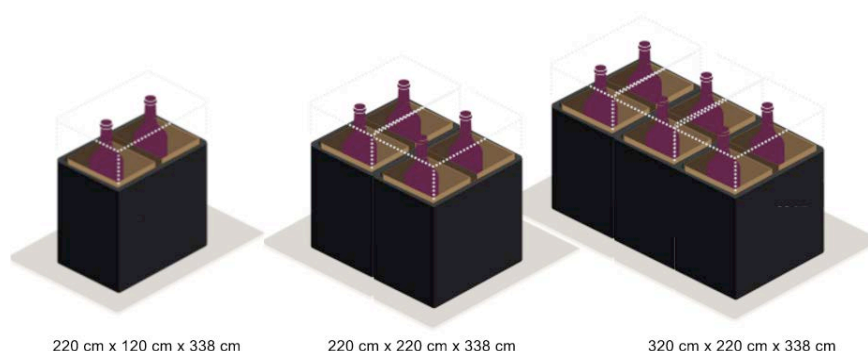


Figura 2 – Padrões de caixa e suas dimensões.

Adicionalmente, neste trabalho também é proposto um modelo para recalcular a rota caso um cliente não seja atendido na programação inicial (seja por ausência do cliente, ou outros motivos), pois, nesse caso, o veículo deve fazer mais uma tentativa de entrega.

O artigo é organizado como segue: na Seção 2, é apresentada uma revisão com trabalhos relevantes sobre os problemas de carregamento, *Vehicle Loading Problem* (VLP), e de roteamento, *Vehicle Routing Problem* (VRP); na Seção 3, apresentam-se os modelos matemáticos propostos; na Seção 4 são apresentados os resultados numéricos dos experimentos computacionais; por fim, na Seção 5, têm-se a apresentação, análise dos resultados e as conclusões.

2. Fundamentação Teórica

Determinar a melhor rota para entregar mercadorias e definir a melhor maneira de carregar tais mercadorias dentro dos veículos utilizados no transporte são questões que se referem, respectivamente, aos problemas de roteamento de veículos (*Vehicle Routing Problem*, VRP) e problemas de carregamento (*Vehicle Loading Problem*, VLP), caracterizados pela elevada complexidade de solução prática [Leung et al. 2011].

Os problemas de carregamento de veículos (VLP) pertencem à família dos problemas de corte e empacotamento (*Cutting and Packing* – C&P) [Dyckhoff 1990]. Segundo [Washer et al. 2007], os problemas do tipo C&P apresentam a mesma estrutura, que pode ser sumarizada como um conjunto de itens, com dimensões geométricas definidas, os quais devem ser atribuídos a um conjunto de objetos com determinada forma geométrica, de tal modo que os limites geométricos sejam respeitados; ou seja, todos os itens devem estar totalmente contidos nos objetos de dimensões maiores e não devem se sobrepor. Adicionalmente, em casos reais, estes problemas também devem considerar como restrição o peso e a forma dos itens. O C&P e o VLP se caracterizam pela minimização do desperdício, que pode expressar a quantidade de material ou

espaço não usado dos objetos grandes [Wäscher et.al. 2007] [Duhamel et al. 2011] [Iori e Martello 2013].

O outro problema abordado neste trabalho é o roteamento de veículos, que trata do processo para elaboração de rotas para veículos de uma frota, com a finalidade de visitar um conjunto de cidades ou clientes geograficamente dispersos, a partir de um depósito, ao menor custo possível, sujeito a restrições operacionais [Laporte 1992].

Existe um consenso na literatura científica de que [Dantzig e Ramser (1959)] tenham sido os primeiros autores a formular o VRP, motivados por uma aplicação real de distribuição de combustível a postos de venda. No trabalho, os autores se referem ao VRP como uma generalização do Problema do Caixeiro Viajante (*Travelling Salesman Problem - TSP*), quando demandas nos postos de vendas e capacidade dos veículos são impostas ao problema. Desde então, muitas variações do VRP foram estudadas, procurando incorporar ao problema original os mais diversos aspectos presentes nas aplicações reais, tanto na forma de objetivos como na forma de restrições, justificando diversas classificações dos tipos de problemas.

Um problema de roteamento real é determinado por três fatores básicos: decisões, objetivos e restrições [Partyka e Hall 2000]. As decisões se referem a atribuir clientes a um conjunto de veículos, abrangendo também a programação e o sequenciamento das visitas. Como objetivo, pretende-se minimizar custos ao mesmo tempo em que se propõe um serviço de alto nível aos clientes. Além disso, o procedimento de roteamento está sujeito a restrições, as quais devem ser respeitadas, sendo elas relacionadas com os recursos disponíveis, limites de tempo, capacidades dos veículos, etc.

Em [Arpini 2015] é citado que, em geral, a construção de resoluções para as áreas de pesquisa dos problemas de carregamento e dos problemas de roteamento têm sido desenvolvidas separadamente. Contudo, como os dois problemas são interdependentes, há limitações relativas à aplicação destes de forma separada. Pela necessidade de gerar resultados mais condizentes com a realidade, abordagens de resolução integrada dos dois problemas têm sido propostas na literatura.

De acordo com [Iori et al. 2007] e [Gendreau et al. 2008], há limitações relativas à aplicação separada dos dois problemas. Uma vez que uma solução viável para o VRP requer que a soma das demandas dos clientes atribuídos a cada veículo não exceda sua capacidade total de carga, nas operações de transporte, o carregamento dos produtos nos veículos pode representar um problema difícil, sobretudo para itens de maior tamanho. Assim, o padrão de carregamento dos itens em cada veículo deve possibilitar uma solução para o problema de roteamento, pois o carregamento influencia fortemente na decisão de sequenciar os clientes ao longo das rotas. Por essa necessidade de gerar modelos mais condizentes com a realidade, algoritmos integrando esses dois aspectos logísticos têm sido propostos recentemente na literatura [Iori e Martello 2010].

Em [Ranck Jr e Yanasse 2010] é definido o problema com um VRP no qual se incluem restrições inerentes ao VLP. Se por um lado a combinação dos dois problemas aumenta a dificuldade combinatorial, por outro permite encontrar uma solução melhor que corresponda aos objetivos logísticos do mundo real. Em seu artigo, [Iori e Martello 2010] apresentam a seguinte classificação para os problemas de roteamento com restrições de carregamento:

(1) 2L-CVRP - *Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints*: Tanto os itens demandados pelos clientes quanto a superfície de carregamento dos veículos são expressos em duas dimensões. Introduzido por [Iori et al. 2007];

(2) 3L-CVRP - *Capacitated Vehicle Routing Problem with Three-dimensional Loading Constraints*: Neste problema consideram-se três dimensões tanto para os itens quanto para os veículos. Para isso, incluem-se restrições adicionais relativas à resistência e estabilidade da carga. Introduzido por [Gendreau et al. 2006], também representado em trabalhos de [Fuellerer et al. 2010] e [Bortfeldt et al. 2013];

(3) MP-VRP - *Multi-Pile Vehicle Routing Problem*: Adiciona restrições de carregamento ao VRP, envolvendo problema de programação de máquinas paralelas. Tal problema surgiu de uma situação do problema de transporte onde uma empresa fornecedora de produtos de madeira, em que cada cliente requer um mix de produtos. Os produtos nesse problema são divididos em duas categorias: compensados curtos e compensados longos que poderiam ser paletizados e, com

isso, podem ser empilhados, seguindo uma restrição de sequenciamento. Introduzido por [Doerner et al. 2007], também foi trabalhado por [Tricoire et al. 2011];

(4) MC-VRP - *Multi-compartments Vehicle Routing Problem*: Veículos com múltiplos compartimentos permitem o transporte de produtos heterogêneos no mesmo veículo, mas em diferentes compartimentos. Possui aplicação prática no contexto industrial, sobretudo na indústria naval e na entrega em terra de produtos petrolíferos. Podem ser encontradas na literatura publicações relativas à distribuição de petróleo [Brown e Graves 1981] [Cornillier et al. 2012] e recolhimento de resíduos [Muyldermans e Pang 2010];

(5) TSPPD - *Traveling Salesman Problem with Pickup and Delivery and Loading Constraints*: Inclui três subdivisões: o TSP-PDL (*TSPPD with LIFO Loading*), onde o carregamento deve seguir uma fila, o TSP-PDF (*TSPPD with FIFO Loading*), onde o carregamento deve seguir uma pilha, e o DTSPMS (*Double Traveling Salesman Problem with multiple stacks*). Este problema consiste em determinar a rota ótima para o TSP considerando a entrega em duas redes separadas utilizando apenas um *container*.

Apesar de existirem várias publicações acerca da integração entre os dois problemas, não foram encontrados trabalhos tratando o interior do veículo como um almoxarifado. A principal diferença do modelo proposto em relação aos modelos existentes na literatura reside no fato de o modelo tratar, ao mesmo tempo, a arrumação da carga no tipo de veículo citado (como um almoxarifado multi-nível) e o problema de roteamento. Adicionalmente, também é apresentado um modelo para revisitação de nós para o caso de falha da entrega.

3. Modelos de Programação Linear Inteira

Nesta seção são apresentados os dois modelos: para arrumação de carga e roteamento de veículos; e para recalculer o roteamento caso o cliente não seja atendido na primeira visita do veículo. O diferencial do primeiro modelo, em relação aos encontrados na literatura para a arrumação de carga e roteamento de veículos, consiste em considerar o veículo como um almoxarifado multi-nível, onde a arrumação do mesmo busca a eficiência no carregamento/descarregamento, a ergonomia do funcionário, já que se busca a menor movimentação possível do funcionário dentro do veículo, além de seu conforto térmico, uma vez que a temperatura dentro dos veículos, que são climatizados, tendem a ser mais baixas que a temperatura ambiente. Como o modelo considera o problema de arrumação de almoxarifado e roteamento de veículos, será chamado de AW-VRP (*Assignment for Warehouse and Vehicle Routing Problem*). O segundo modelo trata do caso onde o cliente não está no local para receber a produto. Neste caso, é norma da empresa, caso o veículo tenha tempo, fazer mais uma tentativa de entrega após um tempo mínimo. Este modelo será chamado de re-roteamento de R-VRP.

Modelo AW-VRP

Para a arrumação da carga, foi considerado o número de estantes dentro do veículo, N_e , o número de prateleiras, N_p , e o comprimento das prateleiras. Para o roteamento, será utilizada a representação de um grafo, $G(N, E)$, em que N é o conjunto de nós, sendo cada nó um cliente, com o número máximo de clientes $|N|$, e E é o conjunto de caminhos entre cada cliente e a garagem.

Notação:

e : índice da estante, $e = 1, \dots, N_e$.

p : índice da prateleira, $p = 1, \dots, N_p$.

k : índice de identificação do veículo, sendo v o número máximo de veículos disponíveis.

i, j : representam os clientes, assim $i, j \in N$.

Parâmetros:

$E[i][j]$: Matriz de adjacências entre os clientes e a garagem.

$T[i][j]$: Matriz de custo entre os clientes e a garagem. Nesta modelagem, usa-se o custo como o tempo de deslocamento de um cliente a outro.

D : Tempo de atendimento de cada cliente.
 $C[i]$: Comprimento do produto referente ao cliente i .
 U^{Cap} : Comprimento máximo da prateleira.

Variáveis:

$P_{p,e,k}^i$: Variável binária, assume 1 se o pedido i está na estante e , prateleira p do veículo k , e 0 caso contrário.

C^k : Indica o uso do veículo, assumindo 1 se o veículo k é usado e zero caso contrário.

$U_{p,k}^e$: Representa o comprimento da estante e , prateleira p no veículo k , que está sendo usado.

$Y_{i,j}^k$: Variável binária, assume 1 se o veículo k passa pela rota que liga os nós i e j , e 0 caso contrário.

H_I : Representa o horário de início das entregas.

H_F : Representa o horário de término das entregas.

B_i^k : Indica o momento em que o veículo k chega ao nó i .

U_{Max} : Indica o comprimento máximo usado de uma prateleira.

Função objetivo: Nesta etapa, serão usadas três funções objetivos. Primeiro busca-se minimizar o número de veículos usados considerando que todos os clientes devem ser atendidos, Expressão (1), representando o custo dominante no problema. Em seguida, é minimizado o comprimento máximo usado nas estantes (2). Esta métrica é uma exigência da companhia, buscando agilizar a entrega dos produtos e melhorar a ergonomia dos funcionários. E por último, a distância total percorrida, Expressão (3). Nota-se que, como se trata de um modelo único, a otimização de qualquer uma das funções objetivos garante a existência de solução para as outras partes do problema. Por exemplo, a minimização do número de veículos não garante a otimização da arrumação da carga, mas garante que existe uma solução para o problema.

$$\text{Min: } \sum_k C^k \tag{1}$$

$$\text{Min: } U_{\max} \tag{2}$$

$$\text{Min: } \sum_k \sum_i \sum_j T[i][j] \times Y_{i,j}^k \tag{3}$$

Restrições:

Arrumação de carga

$$\sum_p \sum_e \sum_k P_{p,e,k}^i = 1; i = 1, \dots, n \tag{4}$$

$$U_{p,k}^e = \sum_i C[i] \times P_{p,e,k}^i; k = 1, \dots, v; p = 1, \dots, Np; e = 1, \dots, Ne \tag{5}$$

$$U_{p,k}^e \leq U^{Cap}; k = 1, \dots, v; p = 1, \dots, Np; e = 1, \dots, Ne \tag{6}$$

$$U_{p,k}^e \leq U_{\max}; k = 1, \dots, v; p = 1, \dots, Np; e = 1, \dots, Ne \tag{7}$$

$$M \times C^k \geq \sum_p \sum_e \sum_i P_{p,e,k}^i; k = 1, \dots, v \tag{8}$$

$$C^k \leq \sum_p \sum_e \sum_i P_{p,e,k}^i; k = 1, \dots, v \tag{9}$$

Roteamento

$$\sum_j Y_{0,j}^k = C^k; k = 1, \dots, v \quad (10)$$

$$\sum_j Y_{j,n}^k = C^k; k = 1, \dots, v \quad (11)$$

$$\sum_i Y_{i,j}^k - \sum_i Y_{j,i}^k = 0; i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, v \quad (12)$$

$$\sum_k \sum_j Y_{i,j}^k = 1; i = 1, \dots, n \quad (13)$$

$$B_0^k = H_j; k = 1, \dots, v \quad (15)$$

$$B_n^k \leq H_F; k = 1, \dots, v \quad (16)$$

$$B_j^k \geq B_i^k + D + T[i][j] - M(1 - Y_{i,j}^k); k = 1, \dots, v; i, j = 1, \dots, n \quad (17)$$

Descrições

As restrições de (4) a (9) são referentes ao problema de arrumação de carga em um veículo dividido em estantes e prateleiras. A Restrição (4) garante que todo cliente será atendido. A Restrição (5) associa o uso de cada prateleira p da estante e no veículo k ao espaço ocupado pelos produtos dos clientes. A Expressão (6) limita o tamanho máximo das prateleiras. A Restrição (7) cria um limite virtual para a prateleira mais usada. Posteriormente, após encontrar o número mínimo de veículos, busca-se reduzir essa distância. Na Expressão (8), M é apenas um auxiliar, que representa um número maior que as somatórias envolvidas no modelo. Assim, esta restrição garante que, se um veículo é utilizado, o mesmo poderá receber carga. A Expressão (9), por outro lado, mostra que, caso o veículo não seja utilizado, nenhuma carga poderá ser atribuída a ele.

As restrições de (10) a (17) modelam o problema do roteamento de veículos. As Restrições (10) e (11) garantem que só receberão uma rota os veículos que foram usados no carregamento. Estas restrições fazem a conexão entre o problema de arrumação da carga e o roteamento de veículos. A Equação (12) garante que todos os clientes serão visitados. A Equação (14) indica o horário de início da operação. A Restrição (15) restringe o horário máximo para término das atividades. A Expressão (16) garante o encadeamento dos horários de chegada de um veículo em cada nó, isto é, o horário de chegada de um veículo no nó j (B_j^l) deve ser, pelo menos, maior do que o horário de chegada ao nó i (B_i^l) mais o tempo para atender o nó i (D) mais o tempo para percorrer o enlace ij ($T[i][j]$), se o veículo k usar o enlace ij ($Y_{i,j}^k$). Como esta restrição trata do encadeamento dos veículos no tempo, ela trata o problema do *subtour* encontrado nos problemas de roteamento.

Modelo R-VRP

Para este modelo, os veículos já estão carregados e em fase de entrega dos pedidos. Caso algum cliente não esteja no local para receber o produto, o motorista deverá fazer uma nova tentativa de entrega pelo menos duas horas após a primeira tentativa. Assim, todo o roteamento deve ser recalculado considerando os nós (clientes) já previstos para este veículo, mais um novo nó, o cliente que deve ser revisitado, chamado de rv . Para este novo modelo, como foi inserido “mais um cliente” não previsto, o objetivo será maximizar o número de clientes atendidos.

Neste modelo serão inseridos, como parâmetros, o momento em que a programação foi interrompida, H_i^f (o momento de chegada em um cliente que não estava), e o tempo mínimo para visitar o cliente, $TR = 2$. Além destes, também será inserida a variável P^i , que é uma variável binária que assume 1 se o pedido i será entregue e zero caso contrário. Sendo n' o número de nós que devem ser visitados, incluindo rv , o nó a ser revisitado.

Função Objetivo: Como mencionado, o objetivo desta formulação é maximizar o número de clientes atendidos.

$$\text{Max: } \sum_i P^i \quad (17)$$

Restrições:

$$\sum_j X_{0,j} = 1; \quad (18)$$

$$\sum_j X_{j,n} = 1; \quad (19)$$

$$\sum_j X_{i,j} = P^i; i = 1, \dots, n' \quad (20)$$

$$\sum_i X_{i,j} - \sum_i X_{j,i} = 0; i = 1, \dots, n' \quad (21)$$

$$BX_0 = H_I^f \quad (22)$$

$$B_n \leq H_F \quad (23)$$

$$BX_j \geq BX_i + D[i] + T[i][j] - M(1 - X_{i,j}); i, j = 1, \dots, n' \quad (24)$$

$$B_{rv} \geq TR \quad (25)$$

Descrições:

As Restrições (18) e (19) são as restrições de início e término da rota, respectivamente. A Equação (20) associa a função objetivo ao modelo, garantindo que, se um cliente foi atendido, o veículo passou por aquele cliente. A restrição (21) é a restrição de continuidade de fluxo. A Equação (22) indica o horário de início da rota. As Restrições (23) e (24) são análogas às Restrições (21) e (17), respectivamente. A Expressão (25) garante que existe um tempo mínimo para visitar um nó.

4. Resultados Numéricos

Os testes computacionais dos modelos propostos foram realizados utilizando dados reais da empresa de *e-commerce* Wine.com.br. A empresa dispõe de 5 caminhões para atender as demandas diárias de clientes situados na região metropolitana de Vitória - ES, atuando diretamente em um raio de atendimento de 30km. Para gerar os dados de entrada, a empresa forneceu os pedidos e endereços dos clientes. Assim, a partir da caracterização de cada pedido, foram calculados o espaço ocupado e a distância desse cliente em relação a todos os outros e a garagem. Cabe destacar que, como é considerado, neste trabalho, um agrupamento dos produtos solicitados pelo cliente, não há necessidade ser inserida uma restrição para que os itens do cliente estejam no mesmo veículo. A distância entre os clientes foi calculada utilizando o roteamento de caminho mais curto fornecido pelo Google e a matriz de tempo (custo) foi obtida considerando uma velocidade de 30km/h. Adicionalmente, foi definido o tempo máximo de 8 horas para a operação de roteamento. O tempo de atendimento de cada cliente foi definido em 5 minutos.

Foram analisadas 11 instâncias com o número de clientes variando de 15 a 200. Para resolução das formulações de cada instância, foi utilizado o CPLEX 12.6, em um computador Intel i7 com 16 GB de memória, sendo estabelecido um tempo limite para execução de cada instância de 2 horas. Para o modelo AW-VRP, foram feitos dois tipos de testes: i) primeiro, analisando a relação entre os problemas de arrumação de carga e roteamento e a complexidade do modelo (tempo de processamento) em relação ao número de clientes. Para esta investigação, foram usadas instâncias com 15, 20, 25, 30 e 40 nós, nomeadas como n15, n20, n25, n30 e n40. ; ii) depois, foi analisado o processo de arrumação de carga. Para isso, foram usadas instâncias

com 50, 60, 70, 80, 100, 120, 150 e 200 clientes, nomeadas como n50, n60, etc. Para o modelo R-RVP, proposto para o re-roteamento, foram investigadas as rotas obtidas nas instâncias n30 e n40.

4.1 Análise da relação entre a arrumação de carga e o roteamento

Na Tabela 1 são apresentadas as análises das instâncias de n15 a n40, sendo apresentados: a instância analisada; o tempo de percurso obtido minimizando o número de veículos; fixando o número mínimo de veículos, são apresentados a otimização do percurso, obtido com a Função Objetivo (3); o tempo de processamento computacional; e o *GAP*, caso o processamento exceda 2 horas. As duas últimas métricas são referentes às Funções Objetivos (3). Em todos os casos, foi possível atender todos os clientes com apenas um veículo. Não foi apresentado o tempo de processamento para obtenção no número mínimo de veículos, pois em todos os casos foi obtido com um tempo inferior a 4 segundos. Nota-se, na segunda coluna, que as distâncias obtidas, usando a Função Objetivo (1), são aleatórias. Isto se justifica pelo fato da distância não ser considerada na Função (1). Portanto, para a eficiência na logística do transporte, após a otimização do número de veículos, deve ser realizada a otimização do percurso de cada veículo. Observando o tempo de processamento e *GAP* da otimização do percurso, nota-se que este subproblema é o que mais influencia na complexidade para obtenção de solução. Adicionalmente, destaca-se que, neste caso, como o baú do caminhão funciona como um almoxarifado, permitindo ao funcionário o acesso a todos os itens transportados, a arrumação de carga pode ser desvinculada do roteamento. Assim, habilitando/desabilitando restrições no modelo AW-VRP, os dois subproblemas podem ser tratados independentemente.

Tabela 1: Comparação entre os resultados obtidos com as funções objetivos (1) E (3)

Instância	Tempo de percurso Função Objetivo (1)	Tempo de percurso Função Objetivo (3)	Tempo de Processamento	GAP
n15	400	179	5s	-
n20	369	192	377s	-
n25	349	188	2h	4%
n30	352	212	2h	21%
n40	358	227	2h	22%

A arrumação de carga usual aplicada nas empresas consiste em completar cada prateleira antes de usar a próxima. Com isso, o funcionário aumenta o tempo em que permanece dentro do baú do caminhão e, durante a distribuição das cargas, têm-se sempre caminhões lotados e, possivelmente, um subutilizado. Com o modelo de otimização proposto neste trabalho, após descobrir o número mínimo de veículos usados, pode-se distribuir uniformemente a carga nos caminhões. Além de reduzir o tempo de permanência do funcionário no baú do veículo, esta distribuição possui duas outras vantagens: i) para os funcionários, dará sensação de justiça da distribuição de tarefas; ii) como, no caso estudado, o veículo deve retornar mais uma vez ao cliente caso este não esteja na primeira tentativa, esta distribuição aumenta a chance do motorista ter tempo para mais uma visita, pois no caso do caminhão estar feito, o motorista não terá tempo de visitar todos os clientes e retornar aos locais em que os pedidos não foram entregues. Esta segunda vantagem é exposta na análise dos resultados no segundo modelo proposto, R-VRP.

Com a arrumação de carga, por ser tratada separadamente do roteamento, sem perda na qualidade da solução, foram simuladas instâncias com 50, 60, 70, 80, 100, 120, 150 e 200 nós, desconsiderando as restrições de roteamento do modelo AW-VRP. Na primeira etapa deste experimento, foi realizada a minimização do número de veículos e, fixando este valor, foi otimizada a arrumação da carga no interior dos veículos, minimizando a Função Objetivo (2). A Tabela 2 apresenta os resultados para a investigação do carregamento dos veículos em instâncias maiores. Esta tabela contém as seguintes informações: a instância, o número de veículos usados,

distância máxima da porta ao final do baú, obtida pela Função Objetivo (2). As instâncias n70 e n80 obtiveram o valor de 204, pois este foi o comprimento máximo de um pedido. Isto significa que, se for considerada a granularidade de item ao invés da granularidade de pedido, provavelmente teria sido encontrado um valor menor. Observando a evolução da arrumação da carga para 2 veículos (n70, n80, n100 e n120), destaca-se que, no caso de arrumação convencional, têm-se um veículo totalmente carregado e outro com a carga baixa, enquanto que, utilizando o modelo proposto, têm-se dois veículos com a carga balanceada. Adicionalmente, no caso da instância n200, têm-se na arrumação convencional 3 veículos completamente carregados e um com a carga baixa. Destaca-se que todas as soluções obtidas foram ótimas (com GAP 0%), dentro do limite de 2 horas processamento. Assim, comparando com os resultados da Tabela 1, conclui-se que o roteamento é o gargalo da complexidade do modelo AW-VRP.

Tabela 2: Análise dos resultados obtidos pelo modelo para arrumação de remandas.

Instância	Número de Veículos Função Objetivo (1)	Distância máxima de um produto Função Objetivo (2)
n50	1	253
n60	1	284
n70	2	204
n80	2	204
n100	2	235
n120	2	278
n150	3	236
n200	4	232

4.2. Re-roteamento

Neste experimento, considerando as rotas já otimizadas minimizando as distâncias obtidas nas instâncias de 30 e 40 nós, foram inseridas “falhas” aleatórias. Cada falha significa que o cliente não estava no local no momento da entrega, assim o motorista deverá retornar a este cliente para uma nova tentativa. Seguindo um critério exigido pela empresa, a nova tentativa deve ser feita pelo menos duas horas após a primeira.

As conclusões do algoritmo ficaram totalmente dentro do previsto. Por exemplo, caso o cliente esteja entre os últimos na ordem para receberem os pedidos, com a sua entrega programada para menos de duas horas antes do final do expediente, o R-VRP forneceu como solução não retornar a este cliente. Além disso, como cada “falha” é tratada como um novo cliente, constatou-se que o problema pode ser encarado com o VRP clássico, sendo: i) a cada “falha” o nó de início será o cliente ausente; ii) onde o veículo deverá percorrer os clientes restantes mais um, o cliente não atendido; iii) e retornar a garagem.

A diferença entre o VRP clássico e o apresentado no presente trabalho está na função objetivo, em que a meta é, primeiramente, maximizar a quantidade de clientes atendidos e, depois, minimizar a distância percorrida, ou seja, diferentemente do VRP clássico, o modelo proposto admite o não atendimento a um cliente.

5. Conclusão

Este artigo propôs dois modelos que agregam características dos problemas de carregamento (VLP) e do roteamento de veículos (VRP), apresentando variações a esses problemas de modo que se aproximassem mais dos desafios encontrados pela empresa de *e-commerce* Wine.com.br, objeto de estudo deste trabalho.

O primeiro modelo, chamado AW-VRP (*Assignment for Warehouse and Vehicle Route Problem*), considera o veículo como um almoxarifado multi-nível e roteamento do mesmo. Este modelo se diferencia por considerar o veículo como um almoxarifado, em que a arrumação do mesmo busca a eficiência no carregamento/descarregamento e também a ergonomia do funcionário (conforto térmico).

Já o segundo modelo, chamado R-VRP, trata de um desafio comumente enfrentado pela empresa, em que o cliente se encontra ausente ou não pode receber o pedido no momento da entrega. Para esses casos, é norma da empresa que, caso exista tempo hábil, deve-se fazer mais uma tentativa de entrega, pelo menos 2 horas após a primeira tentativa.

Os modelos foram testados em instâncias reais, utilizando o solver CPLEX 12.6. Foi constatado nos experimentos computacionais que, especificamente para o caso onde o veículo possui prateleiras com livre acesso do funcionário ao interior do veículo, os problemas de carregamento e roteamento podem ser tratados de forma independente. Além disso, a otimização da arrumação da carga, como foi proposta, proporciona uma distribuição mais uniforme da carga entre os veículos, evitando um carregamento com veículos completamente cheios, enquanto existe um subutilizado. Este tipo de arrumação também influenciará o re-roteamento dos veículos em caso de falha na entrega, pois com o balanceamento das cargas, evitando veículos completamente carregados, aumenta-se a chance de revisitas no caso do cliente não receber o produto na primeira visita. Isto aumentará a satisfação do cliente, métrica importante para o sucesso da empresa.

Operacionalmente, esses resultados podem justificar uma reavaliação e redefinição dos processos utilizados pela empresa atualmente, visando a minimização dos custos pela melhor utilização da frota de caminhões e garantindo a satisfação dos clientes por meio da otimização das distâncias percorridas pelos veículos de transporte e do tempo de entrega dos pedidos.

Como trabalhos futuros, para alcançar resultados com uma escala de pedidos maior, aconselha-se desenvolver heurísticas e/ou meta-heurísticas.

Referências

- Arpini, B. P. (2015). Planejamento da logística de suprimento de plataformas Offshore por meio de um modelo matemático 2L-CVRP com frota heterogênea e equilíbrio náutico. *Transportes*, volume 23, n. 4. ISSN: 2237-1346 (online). DOI:10.14295/transportes.v23i4.920
- Bortfeldt, A.; e Wäscher, G. (2013). Constraints in container loading - A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, volume 229, n. 1, páginas 1-20.
- Brown, G. G.; e Graves, G. W.(1981). Real-time dispatch of petroleum tank trucks. *Management Science*, volume 27, n. 1, páginas 19-32.
- Cornillier, F.; Boctor, F.; e Renaud J. (2012).. Heuristics for the multi-depot petrol station replenishment problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, volume 220, n. 2, páginas 361-369.
- Dantzig, G. B.; e Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, Providence, US, volume 6, páginas 80-91.
- Duhamel, C.; Lacomme P.; Quilliot A.; e Toussaint H.. (2011). A multi-start evolutionary local search for the two-dimensional loading capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, volume 38, n. 3, páginas 617-640.
- Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, volume 44, n. 2, páginas 145-159.

Doerner, K. F.; Fuellerer G. Hartl R. F.; Gronalt M. e Iori M. (2007). Metaheuristics for the vehicle routing problem with loading constraints. *Networks*, volume 49, n. 4, páginas 294-307.

Fuellerer, G.; Doerner K. F.; Hartl R. F.; e Iori M. (2010). Metaheuristics for vehicle routing problems with three-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, volume 201, n. 3, páginas 751-759.

Gendreau, M.; Iori M.; Laporte F.; e Martello S. (2006). A Tabu Search Algorithm for a Routing and Container Loading Problem. *Transportation Science*, volume 40, n. 3, páginas 342-350.

Gendreau, M.; Iori M.; Laporte G.; e Martello S. (2008) A Tabu Search heuristic for the vehicle routing problem with two- dimensional loading constraints. *Networks*, volume 51, n. 1, páginas4-18.

Iori, M.; Salazar-González J.; e Vigo D. (2007). An exact approach for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *Transportation Science*, volume 41 (2), páginas 253-264.

Iori, M.; e Martello, S. (2010). Routing problems with loading constraints. *Top*, volume 18, n.1, páginas 4-27.

Iori, M.; e Martello, S. (2013). An annotated bibliography of combined routing and loading problems. *The Yugoslav Journal of Operations Research*, ISSN: 0354-0243, volume 23, n. 3.

Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, v. 59, p. 345-358.

Leung, S. C. H. (2011) Extended guided tabu search and a new packing algorithm for the two-dimensional loading vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, volume 38, páginas 205-215.

Muyldermans, L.; e Pang, G. (2010). A guided local search procedure for the multicompartment capacitated arc routing problem. *Computers & Operations Research*, volume 37, n. 9, páginas 1662-1673.

Partyka, J. G.; e Hall, R. W. (2000). On the road to service. **OR/MS Today**, volume 27, n. 4, páginas 26-30.

Ranck Jr, R.; e Yanasse, H. H. (2010). O Problema Integrado de Carregamento e Roteamento de Veículos: uma revisão parcial dos trabalhos da literatura. In: *X Worcap*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE: São José dos Campos.

Tricoire, F. (2011). Heuristic and exact algorithms for the multi pile vehicle routing problem. *OR spectrum*, volume 33, n. 4, páginas 931-959.

Wäscher, G. (2007). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, volume 183, n. 3, páginas 1109-1130.

Webshoppers, E-bit. (2016). 33ª Edição. Disponível em: <http://www.ebit.com.br/webshoppers>

Zachariadis, E. E. (2009). A Guided Tabu Search for the Vehicle Routing Problem with two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, volume 195, n.3, páginas 729-743.