



ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



02 a 04
de dezembro 2020

Problema de Roteamento de Veículos Capacitado com Janela de Tempo no Setor Farmacêutico: uma Abordagem Híbrida

Nathália Cristina Ortiz da Silva

Departamento de Ensino - Instituto Federal do Rio Grande do Sul

Matheus Eduardo Ryl

Engenharia Mecânica - Instituto Federal do Rio Grande do Sul

Roger Bianchi

Engenharia Mecânica - Instituto Federal do Rio Grande do Sul

Resumo: O presente artigo aborda o Problema de Roteamento de Veículos Capacitado com Janela de Tempo para um exemplo no setor farmacêutico. O estudo aborda um caso realístico inspirado em uma rede de farmácias do Rio Grande do Sul e foi desenvolvido para finalizar um Projeto de Pesquisa com alunos da Engenharia Mecânica. O problema busca minimizar a distância total percorrida pelos veículos responsáveis pelo atendimento dos clientes, a partir de um único depósito, de modo todos os veículos retornem ao depósito ao final do dia. Primeiramente, adaptou-se um modelo matemático da literatura e utilizou-se uma abordagem exata para encontrar as soluções dos testes realizados. Em seguida, utilizou-se a planilha de livre acesso criada por Erdogan (2017) para encontrar uma solução inicial para o modelo, desenvolvendo uma abordagem híbrida. Os testes computacionais mostram que a abordagem híbrida obteve resultados superiores aos encontrados pela abordagem exata. De maneira geral, os resultados garantem um bom aproveitamento da frota de veículos, o que permite que cada veículo atenda uma microrregião específica. Para trabalhos futuros, deseja-se aplicar outros métodos de otimização e inserir novas características do setor farmacêutico ao problema.

Palavras-chave: Problema de Roteamento de Veículos, Setor Farmacêutico, Abordagem Híbrida.

Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows in a Pharmaceutical Sector: a Hybrid Approach

Abstract: This paper addresses the Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows for an example in the pharmaceutical sector. The study deals with a realistic case inspired in a network pharmacy store from Rio Grande do Sul and it was developed to finalize a Research Project with students of the Mechanical Engineering. The problem aims to minimize the total distance traveled by the vehicles responsible for the serving the customers, from a single depot, such that all the vehicles return to the depot at the end of the day. First, we adapted a mathematical model from literature and we used an exact approach to find the solutions of the performed tests. Then, we used the open source spreadsheet created by Erdogan (2017) to find an initial solution to the model, developing a hybrid approach. The computational tests show that the hybrid approach obtained better results than the exact approach. In general, the results guarantee a good usage of the fleet,

which allows each vehicle to serve a specific micro-region. For future work, we want to apply other optimization methods and insert new characteristics from the pharmaceutical sector to the problem.

Keywords: Vehicle Routing Problem, Pharmaceutical Sector, Hybrid Approach.

1. Introdução

Um dos principais problemas abordados na área Logística trata-se do Problema de Roteamento de Veículos (PRV). Este problema consiste em determinar múltiplas rotas para um conjunto de veículos, a partir de um depósito, que atendam uma quantidade de clientes, de modo que a distância total percorrida seja mínima (Laporte, 2009). Por esta área de pesquisa ser tão vasta e com diversas especificações, os PRVs são divididos em classes, de acordo com as variantes do problema (Pisinger; Ropke, 2007).

O Problema de Roteamento de Veículos Capacitado (PRVC) busca criar rotas de atendimento para atender a demanda exigida pelos clientes, sem que o veículo exceda a sua capacidade máxima (Laporte, 1992). Por sua vez, o Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo (PRVJT) determina as rotas de acordo com o intervalo de tempo em que cada atendimento deve ser realizado (Prescott-Gagnon *et al.*, 2009). O presente estudo aborda o Problema de Roteamento de Veículos Capacitado com Janela de Tempo (PRVCJT), ou seja, busca-se minimizar a distância total, considerando ambas as características mencionadas anteriormente.

Neste trabalho, o PRVCJT é aplicado a um exemplo de distribuição de produtos farmacêuticos nas regiões Noroeste e Nordeste do estado do Rio Grande do Sul e na microrregião Gramado-Canela, considerando a capacidade máxima dos veículos e janelas de tempo para o atendimento dos clientes. O trabalho foi desenvolvido ao finalizar o Projeto de Pesquisa com alunos da Engenharia Mecânica e busca desenvolver um exemplo realístico para auxiliar centros de distribuições de medicamentos, como também farmácias e drogarias, de modo a obter uma boa qualidade e assistência no serviço de entrega dos produtos. O objetivo do estudo é atender clientes situados nas regiões supracitadas por meio de uma rota otimizada, garantindo que os clientes sejam atendidos dentro de um intervalo de tempo estipulado.

As soluções do PRVCJT são obtidas por meio de uma abordagem exata para um modelo de Programação Linear Inteira Mista e, em um segundo momento, por uma abordagem híbrida, em que se obtém uma solução inicial pela planilha de livre acesso desenvolvida por Erdogan (2017). Os resultados mostram que as soluções por meio de uma abordagem híbrida são superiores às obtidas pela abordagem exata, em que a maioria dos testes não encontram uma solução factível no tempo computacional estabelecido. Além disso, a análise das rotas identifica que os veículos atendem, em geral, cidades próximas ou pertencentes a uma mesma microrregião. Em relação às informações da frota, pode-se verificar que, na maioria dos testes realizados, houve um bom aproveitamento dos veículos e o tempo de trabalho foi coerente com o que ocorre em casos reais.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 identifica trabalhos correlatos sobre aplicações do PRV. A Seção 3 descreve o problema farmacêutico abordado. Na Seção 4, define-se a modelagem matemática do PRVCJT, bem como a metodologia presente na planilha de livre acesso utilizada. A Seção 5 apresenta os testes computacionais e, em seguida, os resultados são analisados e discutidos. Por fim, destacam-se as principais contribuições do trabalho e as propostas futuras.

2. Trabalhos correlatos

Esta seção busca apresentar trabalhos recentes e correlatos aos PRVC e PRVJT, bem como suas aplicações. No trabalho de Wy *et al.* (2012), abordou-se um PRV relacionado à coleta de resíduos em canteiros de obras e centros comerciais, com o objetivo de minimizar

o número de veículos utilizados e o tempo total da rota, cumprindo as demandas dos clientes. Os autores propuseram a metaheurística *Large Neighborhood Search* (LNS) para conjuntos de testes que, em alguns casos, são resultantes de problemas reais. Em Ahkamiraad e Wang (2018), desenvolveu-se um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) que relaciona o PRVC e PRVJT com o Problema de *Pickup & Delivery*. Neste caso, os autores propuseram um algoritmo híbrido entre o Algoritmo Genético (AG) e a Otimização por Nuvens de Partículas (PSO), com o objetivo de se obter um conjunto de rotas que atendam aos pontos de coleta e entrega de mercadorias, de modo que o transporte e o custo fixo sejam otimizados.

O trabalho de Zhao e Lu (2019) buscou realizar uma substituição de veículos de combustão interna por veículos elétricos, utilizando PRVC e PRVJT, com frotas heterogêneas e vários depósitos. Os autores utilizaram uma adaptação da metaheurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) e encontraram cerca de 7,52% de economia com os custos operacionais. Por sua vez, Hubert *et al.* (2019) utilizaram uma adaptação do PRVC, em que diversas localidades podem ser utilizadas para alterar a configuração do veículo. Os autores desenvolveram o método de Geração de Colunas, juntamente com a metaheurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) e, com isso, encontraram 42 novas melhores soluções conhecidas.

Alguns PRVC e PRVJT revelam uma atenção especial ao tempo de transporte de produtos, permitindo intervalos mais rígidos. Hungerländer *et al.* (2018) abordaram um PRV para compras online e em uma rede de supermercados, em que os clientes escolhem uma janela de tempo para seus pedidos e, assim, a rota da frota de veículos é atualizada em tempo real. Um modelo de PLIM foi desenvolvido, juntamente com uma heurística, para a solução deste problema. O trabalho de Martins *et al.* (2019) aborda um PRV com janelas de tempos distintas, de acordo com a característica de cada mercadoria, ou seja, o tempo que ela pode ser transportada sem sofrer prejuízos ou alteração em suas propriedades.

3. Descrição do problema

O setor farmacêutico é responsável por desempenhar uma função fundamental para a sociedade: desenvolver um conjunto de produtos que contribuam não apenas para a prevenção de doenças, mas também para o estímulo e recuperação da saúde da população. Em alguns casos, há uma baixa disponibilidade de produtos e, até mesmo, a falta de oferta de determinados medicamentos no mercado nacional e internacional. Este cenário configura um grande problema para os responsáveis pela gestão de indústrias farmacêuticas e proprietários de farmácias, o que implica na necessidade de melhorias na qualidade e assistência deste serviço.

Em situações em que a medicação deve ser mantida continuamente por um paciente, é necessário que se obtenha um sistema de distribuição de maneira eficiente e eficaz, de modo a garantir a presença regular desses produtos nos estabelecimentos de venda. Outro exemplo que tem sido amplamente discutido nos últimos meses trata-se da prevenção de pandemias, como é o caso do Covid-19, vírus responsável por infecções respiratórias. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), a grande preocupação está relacionada com a velocidade no crescimento de casos confirmados da doença. Assim, a demanda por produtos, como o álcool gel 70%, e medicamentos que auxiliem os cuidados com a imunidade, torna-se elevada por um determinado período de tempo, sendo necessário um planejamento sazonal para tal distribuição. Deste modo, nota-se a importância de se estabelecer uma estratégia de distribuição de produtos e medicamentos, com o propósito de otimizar o estoque de farmácias e drogarias de acordo com a demanda da população.

Tendo em vista a importância de tal setor para os demais segmentos da sociedade, o presente artigo aborda um estudo referente a distribuição de produtos farmacêuticos que atenda cidades das regiões Noroeste e Nordeste do Rio Grande do Sul, além do início da

região metropolitana de Porto Alegre, formada pela microrregião Gramado-Canela. O objetivo do estudo é atender as cidades destas regiões por meio de uma rota otimizada, garantindo o abastecimento contínuo de uma rede de farmácias.

4. Metodologia

4.1. Formulação matemática

O modelo matemático do PRVCJT deste trabalho é uma adaptação do modelo de Arenales *et al.* (2007). Assim, considera-se um conjunto de n clientes que podem ser atendidos por um conjunto de m veículos. Os pressupostos do problema são descritos a seguir:

- A rota inicia em um depósito, denominado nó 0, e é finalizada em um depósito, denominado nó $n + 1$;
- Cada cliente é atendido por um único veículo;
- Cada veículo atende um único cliente por vez;
- A demanda de uma rota deve ser menor ou, no máximo, igual a capacidade do veículo;
- O cliente deve ser atendido dentro da janela de tempo estabelecida. Desta forma, tanto o início quanto o fim do atendimento devem ocorrer dentro da janela de tempo.

4.1.1. Notações

Índices

i, j : índice para os clientes;

k : índice para os veículos.

Parâmetros

d_{ij} : distância entre os clientes i e j ;

t_{ij} : tempo de viagem entre os clientes i e j ;

q_i : demanda ou carga requerida pelo cliente j ;

Q_k : capacidade máxima admitida pelo veículo k ;

a_j : início da janela de tempo para o atendimento do cliente j ;

b_j : fim da janela de tempo para o atendimento do cliente j ;

M : valor muito grande;

p : tempo de atendimento ao cliente.

Variáveis

C_{jk} : instante de início de atendimento do cliente j pelo veículo k ;

x_{ijk} : 1, se o cliente i é imediatamente antecessor ao cliente j , para o veículo k ; e 0, caso contrário.

4.1.2. Modelo de Programação Linear Inteira Mista

Primeiramente, descreve-se a modelagem matemática do PRVC. A função objetivo e as restrições são apresentadas, como segue:

$$\min z = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^{n+1} \sum_{i=0, j \neq i}^n d_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Sujeito a

$$\sum_{k=1}^m \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n x_{ijk} = 1; \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+1} x_{ijk} = 1; \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{0jk} = 1; \quad k = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{i(n+1)k} = 1; \quad k = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ h \neq i}}^n x_{ihk} = \sum_{\substack{j=1 \\ h \neq j}}^{n+1} x_{hjk}; \quad h = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$C_{jk} \geq C_{ik} + t_{ij} + p + (x_{ijk} - 1)M; \quad i = 0, \dots, n \quad j = 1, \dots, n+1, \quad i \neq j, \quad k = 1, \dots, m \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n q_j x_{ijk} \leq Q_k; \quad k = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$C_{0k} = 0; \quad k = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$\mathbf{C} \in \mathbb{R}_+^{(n+2)m}, \quad \mathbf{x} \in \mathbb{B}^{(n+1)(n+1)m} \quad (10)$$

A função objetivo (1) busca minimizar o custo total para atender os pedidos dos clientes. As restrições em (2) e (3) representam que cada cliente j só pode ser atendido por um único cliente (ou depósito) i no veículo k , assim como cada cliente i só pode ser atendido por um único cliente (ou depósito) j no veículo k . Os conjuntos de restrições (4) e (5) informam que cada veículo atende apenas um único cliente ao sair do depósito e, conseqüentemente, um único cliente antes de retornar ao depósito. Além disso, estas restrições permitem que o veículo permaneça no depósito, caso não seja necessário para atender a demanda. Em (6), tem-se que os clientes predecessores e sucessores entre si são atendidos pelo mesmo veículo.

As restrições em (7) impedem a formação de sub-rotas ao longo do atendimento, ou seja, o veículo deve retornar ao depósito apenas ao final do atendimento a todos os clientes de sua rota. O conjunto de restrições (8) delimita que a soma das cargas não ultrapasse a capacidade total do veículo k . As restrições em (9) determinam que o instante de início de atendimento do cliente fictício é nulo. Por fim, a restrição (10) representa o domínio das variáveis de decisão.

Se o atendimento ao cliente necessita ser realizado dentro de uma janela de tempo, define-se, então, o PRVCJT. Neste caso, o início do atendimento deve ocorrer dentro de uma janela de tempo $[a_j, b_j]$. As seguintes restrições são adicionadas ao modelo anterior:

$$a_j \leq C_{jk}; \quad j = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, m \quad (11)$$

$$C_{jk} + p \leq b_j; \quad j = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, m \quad (12)$$

Deste modo, os conjuntos de restrições (11) e (12) indicam que o atendimento do cliente j deve ser realizado pelo veículo k , dentro da janela de tempo $[a_j, b_j]$.

4.2. Planilha de livre acesso para Problemas de Roteamento de Veículos

Para a obtenção de resultados aproximados para o PRVCJT, utilizou-se uma planilha eletrônica de livre acesso desenvolvida por Erdogan (2017), que faz uso da metaheurística *Large Neighborhood Search* (LNS) para realizar a otimização do problema supracitado. Esta ferramenta mostra-se eficiente para uma grande variedade de Problemas de Roteamento de Veículos, mesmo sem garantir a otimalidade do problema.

Para utilização desta ferramenta é necessário, primeiramente, realizar o *download* gratuito do *solver*, denominado *VRP Spreadsheet Solver*, disponível em Erdogan (2013). Em seguida, realiza-se um registro no aplicativo *Bing Maps*, que permite visualizar, de forma interativa, mapas e demais dados reais para aplicá-los no PRV desejado. Após as instalações iniciais, obtém-se uma planilha, denominada *VRP Solver Console*, que busca fornecer os dados de entrada para o restante das planilhas existentes. Nesta planilha, pode-se inserir informações, como quantidade de depósitos, o número de tipos de veículos utilizados, o número de clientes atendidos, entre outros parâmetros iniciais.

Após a inserção dos dados na *VRP Solver Console*, preenche-se outras cinco planilhas existentes no *VRP Spreadsheet Solver*. As três primeiras planilhas (Localizações, Distâncias e Veículos) estão relacionadas, simultaneamente, ao endereço dos depósitos e clientes, ao cálculo das distâncias e às informações adicionais sobre os veículos. Uma atenção especial é dada à planilha Localizações, já que nesta etapa é permitido inserir janela de tempo, tempo de serviço, valores de entrega ou coleta para cada cliente, assim como o lucro envolvendo cada atendimento. Por sua vez, as duas planilhas finais (Solução e Visualização) apresentam a solução do problema e visualização da rota obtida.

5. Resultados

5.1. Testes computacionais

O modelo matemático foi implementado em linguagem de programação C++ e, para a solução por meio da abordagem exata, utilizou-se o *software* de otimização *Gurobi Optimization* (versão 9.0.0), com parâmetros *default*. Os testes foram realizados em um computador com sistema operacional *Windows*, com processador Intel Core i5 e 8 GB de RAM. O tempo de 1 hora foi designado para a execução dos testes, por ser um parâmetro comumente encontrado na literatura.

Como mencionado anteriormente, o problema busca otimizar a rota de atendimento aos clientes do setor farmacêutico situados no Noroeste e Nordeste do Rio Grande do Sul, além de cidades da microrregião Gramado-Canela. Sendo assim, as instâncias foram criadas com base em dados realísticos referentes a estas regiões, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Cidades e número de clientes utilizados

Cidade	Número de clientes	Cidade	Número de clientes
Caxias do Sul	15	Veranópolis	1
Flores da Cunha	1	Lagoa Vermelha	1
Farroupilha	1	Vacaria	2
Bento Gonçalves	3	Marau	1
Garibaldi	1	Soledade	1
Carlos Barbosa	1	Carazinho	1
Nova Petrópolis	1	Ibirubá	1
Gramado	4	Erechim	1
Canela	2	Passo Fundo	9

Fonte: Os autores (2020)

As distâncias (em quilômetros) e o tempo de viagem (em minutos) entre os clientes foram designados de acordo com localizações geográficas de estabelecimentos reais. Por sua vez, considera-se que o depósito está situado na cidade com maior população dentre as localidades selecionadas, ou seja, em Caxias do Sul.

Em relação a janela de tempo, analisou-se duas opções: I) o número mínimo de veículos para atender a carga total solicitada pelos clientes e uma janela de tempo com folga; e II) uma quantidade maior de veículos e uma janela de tempo mais justa. A Tabela 2 apresenta especificações em relação a estes dados.

Tabela 2 - Informações dos testes computacionais

Teste	Cidades atendidas	Número de Clientes	Número de Veículos	Início da Janela de Tempo	Final da Janela de Tempo
1	Caxias do Sul	15	3	[0, 120]	[121, 240]
2	Caxias do Sul	15	4	[0, 90]	[91, 180]
3	Caxias do Sul; Flores da Cunha; Farroupilha; Bento Gonçalves; Garibaldi; Carlos Barbosa.	22	4	[0, 150]	[151, 300]
4	Caxias do Sul; Flores da Cunha; Farroupilha; Bento Gonçalves; Garibaldi; Carlos Barbosa.	22	6	[0, 90]	[91, 180]
5	Caxias do Sul; Flores da Cunha; Farroupilha; Bento Gonçalves; Garibaldi; Carlos Barbosa; Nova Petrópolis; Gramado; Canela.	29	4	[0, 210]	[211, 420]
6	Caxias do Sul; Flores da Cunha; Farroupilha; Bento Gonçalves; Garibaldi; Carlos Barbosa; Nova Petrópolis; Gramado; Canela.	29	6	[0, 150]	[151, 300]
7	Caxias do Sul; Flores da Cunha; Farroupilha; Bento Gonçalves; Garibaldi; Carlos Barbosa; Nova Petrópolis; Gramado; Canela; Vacaria; Veranópolis; Lagoa Vermelha; Marau; Soledade; Carazinho; Ibirubá.	37	5	[0, 300]	[301, 600]
8	Caxias do Sul; Flores da Cunha; Farroupilha; Bento Gonçalves; Garibaldi; Carlos Barbosa; Nova Petrópolis; Gramado; Canela; Vacaria; Veranópolis; Lagoa Vermelha; Marau; Soledade; Carazinho; Ibirubá.	37	6	[0, 240]	[241, 480]
9	Caxias do Sul; Flores da Cunha; Farroupilha; Bento Gonçalves; Garibaldi; Carlos Barbosa; Nova Petrópolis; Gramado; Canela; Vacaria; Veranópolis; Lagoa Vermelha; Marau; Soledade; Carazinho; Ibirubá; Erechim; Passo Fundo.	47	6	[0, 300]	[301, 600]
10	Caxias do Sul; Flores da Cunha; Farroupilha; Bento Gonçalves; Garibaldi; Carlos Barbosa; Nova Petrópolis; Gramado; Canela; Vacaria; Veranópolis; Lagoa Vermelha; Marau; Soledade; Carazinho; Ibirubá; Erechim; Passo Fundo.	47	8	[0, 240]	[241, 480]

Fonte: Os autores (2020)

Os valores de início e fim das janelas de tempo (em minutos) foram obtidos por meio de uma distribuição uniforme que considera, além do tempo de viagem máximo, o tempo de atendimento de cada cliente que, no presente estudo, foi determinado por 30 minutos.

Para o transporte dos produtos, optou-se por um veículo do tipo 3/4, também conhecido por Veículo Urbano de Carga (VUC). Considerando as dimensões deste tipo de veículo e uma caixa de tamanho padrão, obteve-se uma capacidade máxima de 340 caixas por veículo. Por sua vez, a carga solicitada por cada cliente foi determinada por uma distribuição

uniforme, de acordo com o tamanho populacional e a qual região da cidade o cliente pertence (centro, bairros próximos ao centro ou bairros mais afastados do centro). O problema descrito não analisa as questões de otimização da carga dentro do veículo.

5.2. Análises e discussões

5.2.1. Análise dos métodos de solução

Nesta primeira análise, observa-se os resultados obtidos para o PRVCJT, por meio da modelagem matemática desenvolvida. A abordagem exata foi utilizada para a otimização do problema e, em seguida, optou-se por uma abordagem híbrida, na qual utiliza-se uma solução inicial por meio da planilha de Erdogan (2017). A Tabela 3 apresenta os valores da função objetivo (FO), *lower bound* (LB), GAP (%) e tempo computacional (s), para ambas as abordagens.

Durante a execução dos testes, pôde-se observar a complexidade computacional dos problemas abordados, principalmente nos casos em que se aumenta a quantidade de clientes e veículos disponíveis. Neste sentido, a abordagem exata obteve apenas as soluções para os testes iniciais (Testes 1, 2, 3 e 4), com 15 e 22 clientes, respectivamente. A partir de 29 clientes (Testes 5 e 6), esta abordagem não encontrou uma solução factível durante o tempo computacional estabelecido. Vale ressaltar que, além do acréscimo de clientes, aumenta-se também a distância que deve ser percorrida, já que a cada novo teste os clientes estão localizados em cidades mais distantes do depósito. Para os testes em que a abordagem exata encontrou solução, nota-se que o Teste 2 resultou em uma solução ótima e o Teste 4 obteve um GAP de 0,83%, ou seja, muito próximo ao ótimo. Isto mostra que, para uma janela de tempo mais ajustada, os exemplos de pequeno porte chegaram em uma solução ótima ou próxima à ótima para os casos e que se aumentou o número de veículos disponíveis.

Tabela 3 - Resultados da abordagem exata e da abordagem híbrida para o PRVCJT

Teste	Abordagem Exata				Abordagem Híbrida			
	FO	LB	GAP (%)	Tempo (s)	FO	LB	GAP (%)	Tempo (s)
1	74,42	33,48	55,0%	3600	74,42	30,56	58,9%	3600
2	99,94	99,74	0%	1790	99,94	99,94	0%	611
3	246,15	212,56	13,6%	3600	244,88	213,34	12,9%	3600
4	303,58	301,07	0,83%	3600	303,58	303,58	0%	895
5	-	460,29	-	3600	644,58	511,26	20,7%	3600
6	-	560,48	-	3600	732,48	598,66	18,30%	3600
7	-	1510,17	-	3600	1659,51	1322,8	20,30%	3600
8	-	1571,44	-	3600	1945,31	1757,75	9,64%	3600
9	-	1043,14	-	3600	2276,2	1127,57	50,50%	3600
10	-	1181,20	-	3600	2934,03	1218,24	58,50%	3600
Média	-	697,36	-	3419,0	1091,49	718,37	25,0%	3030,60
Média*	181,02	161,71	17,4%	3147,5	180,71	161,86	18,0%	2176,50

*Média dos testes que encontraram solução para ambas as abordagens

Fonte: Os autores (2020)

Já para o caso de uma abordagem híbrida, a solução inicial dada pela planilha de livre acesso de Erdogan (2017) permite que o modelo se inicie com uma solução factível e, deste modo, encontre os valores para o *upper bound* e o percentual do GAP. Sendo assim, a Tabela 3 identifica que, além da solução ótima encontrada para o Teste 2, obtém-se também um valor ótimo para o Teste 4, ambos em menos do que 900 segundos de

execução. Além disso, o GAP dos problemas de pequeno e médio porte que não encontraram solução ótima são inferiores a 21%, o que demonstra uma boa qualidade da solução. A exceção, neste caso, é identificada no Teste 1, em que o GAP é superior a 50%, além dos testes com 47 clientes.

Em relação às médias obtidas, nota-se que os valores do *lower bound* alcançaram resultados superiores para as soluções pela abordagem híbrida, o que impacta diretamente nos valores obtidos para o GAP. Do mesmo modo, nota-se que o tempo computacional para a execução dos testes foi menor para a abordagem híbrida, devido às soluções ótimas obtidas por este método.

5.2.2. Análise das rotas obtidas

Após a realização dos testes computacionais, inicia-se a análise das melhores rotas obtidas. Os testes 1 e 2 estabelecem uma rota de atendimento a clientes da cidade de Caxias do Sul. Em ambos os testes, dois veículos são responsáveis pelo atendimento de clientes no centro da cidade, enquanto os demais veículos atendem clientes centrais que ainda não foram atendidos, clientes próximos ao centro e em bairros mais afastados.

Nos testes 3 e 4, além do atendimento à cidade de Caxias do Sul, também se incluiu entregas nas cidades de Flores da Cunha, Farroupilha, Garibaldi, Bento Gonçalves e Carlos Barbosa. No Teste 3, um veículo realizou as entregas no centro de Caxias do Sul, enquanto outro veículo atendeu Caxias do Sul e, em seguida, Farroupilha. O terceiro veículo foi usado exclusivamente para as cidades de Garibaldi, Bento Gonçalves e Carlos Barbosa. Já o quarto veículo realizou o atendimento em Flores da Cunha e Caxias do Sul. Por sua vez, o Teste 4 possui três veículos que estão designados à cidade de Caxias do Sul, sendo que um deles fica responsável apenas por clientes no centro da cidade. Um quarto veículo atende também clientes da cidade de Caxias do Sul, mas segue para Flores da Cunha, antes de retornar ao depósito. Os dois últimos veículos atendem as cidades de Bento Gonçalves, Farroupilha, Garibaldi e Carlos Barbosa. Este cenário mostra que ambos os testes utilizam um veículo para atender Flores da Cunha e outro(s) para as cidades de Bento Gonçalves, Farroupilha, Garibaldi e Carlos Barbosa, o que é coerente com a localização geográfica destas cidades, visto que Flores da Cunha fica ao Norte de Caxias do Sul e as demais cidades ficam a Oeste de Caxias do Sul.

Os testes 5 e 6 acrescentam as cidades de Nova Petrópolis, Gramado e Canela ao conjunto mencionado anteriormente. Estas cidades situam-se a Sudeste de Caxias do Sul, iniciando a região metropolitana de Porto Alegre. No Teste 5, um dos veículos atende clientes em Caxias do Sul, Nova Petrópolis e Canela, enquanto um outro atende Caxias do Sul, Gramado e Canela. Portanto, dois veículos são necessários para atender a microrregião Gramado-Canela. O terceiro veículo atende Flores da Cunha, Caxias do Sul e, em seguida, Farroupilha. Já o quarto veículo realiza o atendimento em Bento Gonçalves, Garibaldi, Carlos Barbosa e, no retorno, clientes em Caxias do Sul. No caso do Teste 6, um veículo atende Caxias do Sul e Nova Petrópolis, enquanto outro veículo atende apenas clientes em Gramado e Canela. Porém, nota-se que um cliente em Canela ainda não foi atendido por um destes veículos. Assim, um terceiro veículo atende clientes em Bento Gonçalves, Carlos Barbosa e, ao final do trajeto, dirige-se até Canela para atender o cliente restante. O quarto veículo atende Caxias do Sul, Garibaldi e Bento Gonçalves, já o quinto veículo atende clientes em Caxias do Sul e Farroupilha. Por fim, o sexto veículo realizou o atendimento em Flores da Cunha e, em seguida, os clientes restantes em Caxias do Sul. De modo geral, os veículos atendem cidades de uma mesma microrregião, para ambos os testes. A única exceção ocorre com o terceiro veículo do Teste 6 que, após realizar as entregas em Bento Gonçalves e Carlos Barbosa, desloca-se para Canela.

Nos casos 7 e 8, aumentam-se as cidades de Veranópolis, Vacaria, Lagoa Vermelha, Soledade, Carazinho, Ibirubá e Marau ao conjunto. Veranópolis está situada ao Norte de

Bento Gonçalves, enquanto Lagoa Vermelha e Vacaria estão ao Norte de Flores da Cunha. As demais cidades são as primeiras da região Noroeste do Rio Grande do Sul a serem inseridas nos testes. No Teste 7, um veículo atende as quatro cidades da região Noroeste: Soledade, Carazinho, Ibirubá e Marau. O segundo veículo atende clientes em Caxias do Sul, em seguida, vai até Lagoa Vermelha, Vacaria, Flores da Cunha e, por fim, volta a Caxias do Sul para atender outros clientes. O terceiro veículo realiza entregas em Caxias do Sul, Canela e em Carlos Barbosa. O quarto veículo se desloca para Bento Gonçalves, depois percorre as cidades Veranópolis, Garibaldi, Farroupilha e, ao final do trajeto, atende clientes em Caxias do Sul. O quinto veículo realiza o atendimento de Nova Petrópolis, Gramado, Canela e, por fim, atende clientes em Caxias. Por sua vez, o Teste 8 possui um veículo responsável pelo atendimento nas cidades de Ibirubá, Soledade e Carazinho. O segundo veículo atende Caxias do Sul, Flores da Cunha, Vacaria e Lagoa Vermelha. Já o terceiro veículo atende Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Garibaldi, Veranópolis e Marau. O quarto veículo destina-se a Gramado, Canela e retorna a Caxias do Sul para o atendimento de alguns clientes, enquanto o quinto veículo atende um cliente restante em Canela, Nova Petrópolis e Caxias do Sul. O último veículo atende Farroupilha e finaliza os atendimentos em Caxias do Sul. Mais uma vez, nota-se que a exceção ocorre no terceiro veículo do Teste 7.

O último cenário é composto pelos testes 9 e 10, em que as cidades de Erechim e Passo Fundo são inseridas. No Teste 9, dois veículos atendem a microrregião de Gramado-Canela e clientes em Caxias do Sul. O terceiro veículo realiza atendimentos em Bento Gonçalves, Garibaldi, Carlos Barbosa, Farroupilha, Caxias do Sul e Flores da Cunha. O quarto veículo se dirige Veranópolis, Passo Fundo, Carazinho e Ibirubá, enquanto o quinto veículo atende Erechim, Passo Fundo e Soledade. Por fim, o sexto veículo atende clientes em Caxias do Sul e, em seguida, Vacaria, Lagoa Vermelha e Marau. No Teste 10, um veículo é responsável apenas pelo atendimento em Passo Fundo, enquanto um segundo veículo atende clientes de Passo Fundo, segue a Erechim e finaliza sua rota em Marau, antes de voltar ao depósito. O terceiro veículo realiza o atendimento em Garibaldi e, em seguida, dirige-se à região Noroeste, nas cidades de Carazinho, Ibirubá e Soledade. Já o quarto veículo atende Bento Gonçalves, Veranópolis e o restante dos clientes em Passo Fundo. O quinto veículo atende clientes em Caxias do Sul e segue para as cidades de Farroupilha, Bento Gonçalves, Carlos Barbosa e, por fim, segue a Canela para realizar um atendimento. O sexto cliente realiza as entregas em Nova Petrópolis, Gramado, Canela e retorna a Caxias para atender alguns clientes. Os dois últimos veículos ficam responsáveis pelo atendimento do restante dos clientes de Caxias do Sul e das cidades de Vacaria, Lagoa Vermelha e Flores da Cunha.

De forma geral, os veículos realizam as rotas de atendimento a cidades próximas ou de uma mesma microrregião. Além disso, nota-se que, para alguns casos, o veículo realiza os atendimentos em Caxias do Sul no início da rota e, em outros casos, antes de retornar ao depósito. Este fato se deve aos valores da janela de tempo, já que o veículo pode atender as cidades prioritárias e voltar aos clientes de Caxias do Sul apenas ao fim do percurso, sem prejudicar o intervalo estabelecido.

5.2.3. Análise de informações relevantes sobre os veículos

A última análise deste trabalho refere-se as características obtidas em relação ao veículo e sua trajetória. A Tabela 4 apresenta os valores médios do número de clientes atendidos por veículo, o percentual de aproveitamento ou ocupação total do veículo em relação à carga transportada e, por fim, o tempo total de trabalho, incluindo o tempo de viagem e o tempo de atendimento aos clientes, por veículo. Em relação ao aproveitamento dos veículos, adaptou-se a medida de performance Uso da Frota Bruta, proposta por Schenekemberg *et al.* (2020). Os autores realizam o cálculo deste indicador para um *Inventory Routing*

Problem (IRP) com gestão de frotas, enquanto, na presente pesquisa, analisa-se a média entre a razão da carga total dos clientes pela capacidade total do veículo para o PRVCJT.

Tabela 4 - Informações sobre os veículos

Teste	Média de clientes atendidos por veículo	Média da ocupação total do veículo	Média do tempo total de trabalho por veículo (min)
1	5,00	88,92%	220,33
2	3,75	66,69%	167,75
3	5,50	78,75%	287,50
4	3,67	52,50%	190,83
5	7,25	87,13%	429,50
6	4,83	58,09%	295,67
7	7,40	79,00%	601,80
8	6,17	65,83%	524,33
9	7,83	85,54%	672,33
10	5,88	64,15%	566,00

Fonte: Os autores (2020)

Os resultados mostram que, nos testes com uma quantidade inferior de veículos (Testes 1, 3, 5, 7 e 9), o aproveitamento do veículo é maior do que nos demais casos, obtendo-se uma ocupação média entre 78% a 89% do volume total do veículo. Ainda assim, os testes com um número maior de veículos resultaram em uma ocupação média maior do que, aproximadamente, 52% do volume total do veículo, mostrando-se uma estratégia viável para casos de necessidade de urgência na entrega dos produtos.

Por fim, realizou-se uma análise quanto ao tempo total de trabalho, em média, dos veículos. Neste caso, nota-se que os Testes 1, 2, 3 e 4 alcançaram um tempo total de trabalho baixo, já que, em média, cada veículo atendeu entre 3,67 a 5,5 clientes e as distâncias entre estes clientes são relativamente próximas. Por sua vez, a partir do Teste 5, aumenta-se a média do tempo total de trabalho, de acordo com a inserção de novos clientes. Além do crescimento na média de clientes atendidos por veículos, as cidades incluídas nos novos testes estão situadas em pontos geográficos mais distantes, o que também interfere no tempo total de trabalho.

6. Considerações Finais

O presente artigo abordou o Problema de Roteamento de Veículo Capacitado com Janela de Tempo no setor farmacêutico. O problema busca otimizar a rota de distribuição de produtos farmacêuticos para clientes de cidades do Rio Grande do Sul, respeitando a capacidade máxima dos veículos e a janela de tempo em que o cliente deve ser atendido.

Para encontrar a solução do PRVCJT, utilizou-se uma modelagem matemática adaptada da literatura. Em uma primeira análise, realizou-se uma comparação entre o método exato e uma abordagem híbrida, em que a solução inicial do problema é dada pela planilha de livre acesso de Erdogan (2017). Os resultados mostram que a abordagem híbrida obteve duas soluções ótimas, além de encontrar um GAP médio de 25% para todos os testes realizados, enquanto a abordagem exata obteve soluções factíveis apenas nos quatro primeiros testes. As rotas também foram analisadas e, de maneira geral, obteve-se que os veículos atenderam cidades próximas ou em uma mesma microrregião. Em relação a frota de veículos, obteve-se uma ocupação total entre 78% a 89% em relação a capacidade máxima do veículo, para os testes com a quantidade mínima de veículos e janela de tempo com maior folga.

Como propostas futuras, sugere-se trabalhar com mais características do problema, como tipos diferentes de veículos e mais do que um depósito. Além disso, pretende-se desenvolver outras técnicas de otimização, como metaheurísticas ou mateheurística, para trabalhar com um número maior de clientes e com outras regiões do Rio Grande do Sul.

Referências

Ahkamiraad, A.; Wang, Y. Capacitated and Multiple Cross-Docked Vehicle Routing Problem with Pickup, Delivery, and Time Windows. **Computers & Industrial Engineering**, v. 119, p. 76-84, 2018.

Arenales, M.; Armentano, V.; Morabito R.; Yanasse, H. **Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2007.

Erdogan, G. VRP Spreadsheet Solver. Disponível em: <http://verolog.deis.unibo.it/vrp-spreadsheet-solver>, 2013.

Erdogan, G. An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems. **Computers & Operations Research**, v. 84, p. 62-72, 2017.

Hubert, S.; Cordeau, J. F.; Geiger, M. J. A matheuristic for the swap body vehicle routing problem. **OR Spectrum**, v. 42, p. 111-160, 2019.

Hungerländer, P.; Maier, K.; Pocher, J.; Rendl, A.; Truden, C. Solving an On-Line Capacitated Vehicle Routing Problem with Structured Time Windows. **Operation Research Proceedings**, p. 127-132, 2018.

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

Laporte, G. Fifty years of Vehicle Routing. **Transportation Science**, v. 43, n. 4, p. 408-416, 2009.

Martins, S.; Ostermeier, M.; Amorin, P.; Hübner, A.; Almada-lobo, B. Product-oriented time window assignment for a multi-compartment vehicle routing problem. **European Journal of Operations Research**, v. 276, p. 893-909, 2019.

Pisinger, D.; Ropke, S. A general heuristic for Vehicle Routing Problems. **Computers & Operations Research**, v. 34, p. 2403-2435, 2007.

Prescott-Gagnon E.; Desaulniers G.; Rousseau L-M. A branch-and-price-based large neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with time windows. **Networks**, v. 54, p. 190–204, 2009.

Scheneckemberg, C. M.; Scarpin, C. T.; Pécora Jr, J. E.; Guimarães, T. A.; Coelho, L. C. The two-echelon inventory-routing problem with fleet management. **Computers & Operations Research**, v. 121, 2020.

Wy, J.; Kim, B. I.; Kim, S. The rollon–rolloff waste collection vehicle routing problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, v. 224, p. 466-476, 2012.

Zhao, M.; Lu, Y. A Heuristic Approach for a Real-World Electric Vehicle Routing Problem. **Algorithms**, v. 12, p. 45-64, 2019.