

**Ministério da Educação**  
**Universidade Federal de Ouro Preto**  
**Escola de Minas**  
**Departamento de Engenharia de Produção, Administração e Economia**

FABRÍCIO FERNANDES GUERRA

**Roteirização dos veículos rodoviários utilizados no  
transporte dos maquinistas de uma empresa  
ferroviária**

Ouro Preto  
2022

Fabício Fernandes Guerra

**Roteirização dos veículos rodoviários utilizados no transporte  
dos maquinistas de uma empresa ferroviária**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Produção.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Prof. Dr. Helton Cristiano Gomes

Ouro Preto  
2022



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Fabício Fernandes Guerra**

### **Roteirização dos veículos rodoviários utilizados no transporte dos maquinistas de uma empresa ferroviária**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 03 de novembro de 2022.

#### Membros da banca

Doutor - Helton Cristiano Gomes - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto  
Mestrando PPGEP - Ruan Carlos Silva Menezes Pinheiro - Universidade Federal de Ouro Preto  
Mestre - Cristiano Luís Turbino de Franca e Silva - Universidade Federal de Ouro Preto

Helton Cristiano Gomes, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 07/11/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Helton Cristiano Gomes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/11/2022, às 21:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Luis Turbino de Franca e Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/11/2022, às 21:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0421978** e o código CRC **7910E89E**.

## Resumo

A busca pela eficiência logística é um dos fatores determinantes para a manutenção de empresas que realizam o transporte de recursos no mercado, pelo fato de garantir melhoria no nível de serviço e nos resultados financeiros da organização. Este trabalho trata da roteirização de veículos utilizados no transporte dos maquinistas de uma empresa do setor ferroviário. Nesse problema os trens realizam o carregamento e transporte de minério de ferro, sendo que os maquinistas devem ser entregues e coletados nos terminais de carregamento e pontos de troca na malha ferroviária determinados pela programação dos trens. O objetivo da roteirização é minimizar a distância total percorrida pelos veículos e garantir que as trocas dos maquinistas ocorram no horário e local previsto. O problema de roteirização dos veículos no artigo apresentado possui restrições de janela de atendimento na entrega dos maquinistas, capacidade dos veículos e jornada de trabalho dos motoristas. Com isso, é definido como o Problema de roteamento de veículos com janela de tempo e entrega e coleta simultânea (PRVJTCEs). Nas simulações realizadas o programa obteve resposta viável com duração de 3 segundos e redução na distância total percorrida pelos veículos.

**Palavras-chave:** Logística, Roteirização, Ferrovia.

## Abstract

Efficiency through logistics is one of the determining factors for the maintenance of the company that carries out the transport of improvement in the market, because it guarantees the level of service and the financial results of the organization. This work deals with the routing of vehicles used in the transport of the machinists of a company in the railway sector. Issue with trains sent to load and transport iron ore being sent to freight trains and sent to loading terminals and sent to freight trains in the shipping box for shipment of trains. The purpose of rotation is to minimize the total traveled by vehicles and ensure that the changes of train drivers do not take place at the scheduled time and place. The vehicle routing problem in the rote article presented of the machinist vehicles having a service window in the delivery of workers, capacity of delivery vehicles and work of employees. Thus, it is defined as the Vehicle Routing Problem with Time Window and Simultaneous Delivery (PRVJTCEs). In the simulations carried out, the program obtained a viable response with a duration of 3 runs and a reduction in the total distance traveled by the vehicles.

**Keywords:** Logistics, Routing, Railway.

## Lista de abreviaturas e siglas

PCP	Planejamento e Controle da Produção
SI	Sistema de Informação
IBM	International Business Machines
CNT	Confederação Nacional do Transporte
PRV	Problema do roteamento de veículos
PRVJT	O problema de roteirização com janela de tempo
PRVCES	O Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultânea
PRVJTCES	O Problema de roteamento de veículos com janela de tempo e entrega e coleta simultânea

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de PRVCEs	14
Figura 2 – Mapa Paraopeba	23
Figura 3 – Tabela distância e tempo de deslocamento	24
Figura 4 – Percurso Carro 1	25
Figura 5 – Percurso Carro 2	25
Figura 6 – Percurso Carro 3	25
Figura 7 – Percurso Carro 1	26
Figura 8 – Percurso Carro 2	26
Figura 9 – Percurso Carro 3	27
Figura 10 – Quilômetros Percorridos	27

# Sumário

	<b>Lista de ilustrações</b> . . . . .	5
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	7
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> . . . . .	9
<b>2.1</b>	<b>Logística</b> . . . . .	9
<b>2.1.1</b>	<b>Transporte Rodoviário</b> . . . . .	9
<b>2.1.2</b>	<b>Roteirização</b> . . . . .	10
<b>2.2</b>	<b>Programação Linear</b> . . . . .	10
<b>2.2.1</b>	<b>Problema do Roteamento de Veículos</b> . . . . .	11
<b>2.2.2</b>	<b>Roteirização com janela de tempo</b> . . . . .	12
<b>2.2.3</b>	<b>Problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultânea</b> .	13
<b>2.2.4</b>	<b>Problema de roteamento de veículos com janela de tempo e entrega e</b>	
	<b>coleta simultânea</b> . . . . .	15
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	17
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> . . . . .	22
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .	29
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	30
	<b>ANEXOS</b>	31

# 1 Introdução

A constante busca por eficiência e redução de custos nos processos realizados pelas organizações são fatores determinantes na melhoria da gestão de recursos. Nesse contexto, surgem ferramentas para auxiliar as empresas na tomada de decisão com o intuito de torná-la mais competitiva. Empresas que possuem custos significativos no transporte de recursos têm utilizado a roteirização para reduzir os custos logísticos, aumentar a satisfação do cliente, dar flexibilidade ao processo logístico, pontualidade nas tarefas de entrega, coleta e planejamento na realização das rotas.

A roteirização surgiu como ferramenta para auxiliar as organizações no planejamento das rotas de entrega e coleta de mercadorias e pessoas. Os primeiros estudos relacionados com a roteirização tinham como objetivo determinar a rota com a menor distância que um mercador ambulante deveria percorrer para vender suas mercadorias, atualmente existem estudos relacionando entrega e coleta simultânea de mercadorias, entrega de mercadorias dentro de uma janela de tempo, problemas em que a frota de veículos é heterogênea. Esses modelos têm como benefício o desenvolvimento de cenários semelhantes à realidade do problema estudado, com isso, o resultado obtido será mais assertivo.

Esse estudo de caso tem como objetivo definir as rotas que os veículos rodoviários de uma companhia ferroviária deverão realizar para transportar os maquinistas. No modelo atual a roteirização dos veículos é desenvolvida pelo operador de escala, utilizando a programação de circulação dos trens e conhecimento prévio. Pelo fato de realizarem diversas tarefas durante o dia, a programação dos veículos não é realizada de forma eficiente, acarretando prejuízos financeiros, operacionais e trabalhistas para a empresa. Sendo assim, a roteirização surge como ferramenta de auxílio na tomada de decisão no planejamento do transporte rodoviário da empresa, com o objetivo de percorrer a menor distância com os veículos e entregar os maquinistas nos pontos de trocas de acordo com a programação de circulação dos trens e de equipagem.

A roteirização é um problema de programação linear e segundo definição de 2021 da IMB (International Business Machines): “A programação linear (PL) consiste em otimizar uma função linear sujeita a restrições lineares por meio de variáveis reais. Em PL, o modelo de um problema é expresso por meio de variáveis numéricas combinadas em restrições lineares e governadas por uma função objetiva linear e por limites nas variáveis.” Nesse estudo de caso a função objetivo consiste no cálculo do custo total das rotas realizadas, que envolve os custos por quilômetro percorrido, valor fixo para cada veículos e horas improdutivas dos maquinistas.

Já as restrições permitem que o programa de roteirização produza soluções que podem ser implementadas e condizentes com a realidade, porém sua quantidade está diretamente relacionada com a complexidade computacional do método de resolução. No problema

---

descrito é vital que o programa obtenha soluções com tempo de processamento baixo, pois a programação dos trens sofre mudanças ao longo dia, devido ao tempo de carregamento dos trens nos terminais, tempo de circulação entre os pátios, atrasos na apresentação de maquinistas, ocorrências ferroviárias e acidentes ferroviários.

## 2 Referencial teórico

### 2.1 Logística

Segundo [Nogueira, Gonçalves e Novaes \(2007\)](#) a logística é descrita como o ato de planejar, implementar e controlar de forma eficiente o fluxo e a armazenagem de produtos, bem como os serviços e informações associados, cobrindo desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender os requisitos do consumidor. Os avanços tecnológicos permitiram eficiência e qualidade nos processos logísticos, tornando as companhias mais competitivas.

Com isso, é importante que as empresas mensurem e analisem o desempenho dos processos logísticos, para que as ações corretivas sejam realizadas a partir de diagnósticos. Um importante indicador para análise do desempenho do processo logístico é o nível de serviço. [Christopher \(1999\)](#) aponta os principais indicadores que caracterizam o nível de serviço:

- Disponibilidade do produto;
- Tempo de ciclo de pedido;
- Consistência do prazo de entrega;
- Frequência de entrega;
- Flexibilidade do sistema de entrega;
- Sistema de recuperação de falhas;
- Sistema de informação de apoio;
- Apoio na entrega física e apoio pós-entrega.

O nível de serviço mensura a qualidade do serviço prestado pela organização, com o objetivo de garantir a satisfação do cliente e a eficiência nos processos. Na empresa estudada, os clientes são empresas que fazem a utilização do transporte de cargas ferroviário, assim, é importante que as cargas sejam entregues no prazo e quantidade prevista. Para que isso ocorra, é vital que o tempo de carregamento, circulação e descarregamento dos trens tenham duração prevista pelo planejamento da organização, para que os produtos sejam entregues na data e hora prevista.

#### 2.1.1 Transporte Rodoviário

De acordo com dados da CNT (Confederação Nacional do Transporte) o transporte rodoviário possui o maior volume de passageiros transportados entre os modais logísticos.

Segundo levantamentos realizados pela CNT, transportou cerca de 54 milhões de passageiros no acumulado de janeiro de 2020 e foi utilizado com mais frequência entre curtas distâncias. Pelo fato do transporte representar até 60% dos custos logísticos, as organizações devem buscar realizá-lo de forma eficiente, para que assim consigam ter preços competitivos. Dentre os custos diretos, os mais relevantes são: depreciação do veículo, salários e gratificações dos operadores, seguro da carga, combustível, pneus, lubrificação e licenciamento. Já os custos indiretos não estão relacionados diretamente com a operação, contabilidade da empresa, setor pessoal e administração em geral. (GOMES; RIBEIRO, 2020). Uma ferramenta importante para reduzir os custos logísticos é a roteirização, descrita a seguir.

### 2.1.2 Roteirização

A roteirização surgiu como ferramenta para auxiliar as organizações no planejamento das rotas percorridas pelos veículos. Como foi dito, os custos com o transporte representam a maior parcela dos custos de empresas logística é vital que elas sejam eficientes nas operações. Ela pode ser definida como o processo que busca o roteiro ou sequência de paradas para embarque ou desembarque que devem ser seguidas por determinados veículos. E o objetivo principal é fazer com que todos os pontos geográficos pré-determinados sejam atendidos (NETO, 2005).

A roteirização pode ser aplicada em qualquer companhia que possua veículos para transporte de recursos, com o objetivo de minimizar os custos de transporte, manutenção e atraso na entrega dos produtos. Outro benefício da roteirização é o fato de reduzir a carga mental de trabalho atribuída aos funcionários. O conceito de carga mental do trabalho é um produto conceitual originado da noção de carga de trabalho, entendida genericamente como um campo de interação entre as exigências da tarefa e a capacidade de realização humana. Para Velázquez et al. (1995), o trabalho mental implica mecanismos mentais de decisão e tratamento da informação, que necessitam de estruturas superiores, como atenção, pensamento e memorização.

A programação dos veículos é desenvolvida pelos operadores de escala e demandam ações de memorização, pensamento e atenção no planejamento. Com a roteirização essa tarefa será realizada pelo computador, com isso, o operador de escala ficará incumbido de digitar os parâmetros da roteirização e verificar se a resposta obtida é viável.

## 2.2 Programação Linear

A roteirização desenvolvida no artigo é um problema de programação linear, e segundo Moreira (2010) é um modelo matemático desenvolvido para resolver problemas com variáveis que expressam medidas, sendo as relações entre elas representadas por equações e inequações. Sua estrutura é composta por função objetivo e restrições. A primeira é

representada por uma expressão composta pelas variáveis de decisão, que representa grandezas que podem assumir diversos valores. A função objetivo expressa a razão pelo qual o problema está sendo implementado, se possui o objetivo de maximizar ou minimizar recursos e o valor das variáveis de decisão que satisfaça todas as restrições será a solução do problema. As restrições são equações e inequações formuladas a partir das informações do problema que representam as limitações das organizações, sem elas os problemas não poderiam ser implementados pelo fato de não serem factíveis. Sabe-se que tempo, dinheiro, maquinário, funcionários e espaço físico são limitações de todas as organizações e conhecê-las é fundamental para formular modelos matemáticos que estejam de acordo com a realidade. O problema de roteirização estudado nesse artigo tem o objetivo de minimizar o custo do transporte dos maquinistas da empresa, satisfazendo as restrições da logística rodoviária da companhia e é descrito com uma das variações do problema de roteamento de veículos, descrito a seguir.

### 2.2.1 Problema do Roteamento de Veículos

Segundo Laporte (1992) foi introduzido em 1959 por Dantzig e Ramser no artigo “O Problema de Despacho de Caminhões” nos anos 50, para resolver um problema de distribuição de gasolina, a partir disso o número de pesquisas e trabalhos relacionados com o PRV cresceram significativamente.

Segundo Cordeau et al. (2002) o problema pode ser definido com um grafo orientado representado por  $G = \{V, A\}$ , em que  $V = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_n\}$  representa os vértices do problema, no problema estudado são os pontos de trocas dos maquinistas e  $A = \{(vi, vj) : vi, vj \in V, i < j\}$  é representado pelos arcos que representam o percurso entre os vértices. Para cada arco é atribuído um custo de deslocamento representado por uma matriz de distância  $c_{ij}$  ou matriz de tempo  $t_{ij}$ .

Cada ponto de troca possui demanda  $q_i$  de maquinistas que pode ser entregues ou recolhidos dentro da janela de tempo do serviço. A companhia ferroviária estudada no artigo possui frota de veículos de quantidade  $K$ , que pode ser ajustada de acordo com a demanda de serviços.

$$\text{minimizar } z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} \left( \sum_{k \in K} x_{ijk} \right) \quad (1)$$

$$\sum_k y_{ik} = 1, \quad i = 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_k y_{ik} = m, \quad i = 1 \quad (4)$$

$$\sum_i y_{ik} q_i \leq Q_k, \quad k = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$\sum_j x_{ijk} = \sum_j x_{jik} = y_{ik} \leq Q_k, \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \geq |S| - 1, \quad \forall S \subset \{2, \dots, n\} \quad k = 1, \dots, m \quad (7)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (9)$$

As seguintes notações são adotadas:

$x_{ijk}$ : Variável binária que assume valor 1 quando o veículo  $k$  visita o cliente  $j$  imediatamente após o cliente  $i$ , 0 em caso contrário.

$y_{ik}$ : Variável binária que assume valor 1 se o cliente  $j$  é visitado pelo veículo  $k$ , 0 em caso contrário.

$q_i$ : Demanda do cliente  $i$ .

$Q_k$ : É a capacidade do veículo  $k$ .

$c_{ijk}$ : É o custo para percorrer o trecho com origem no cliente  $i$  e destino no  $j$ .

## 2.2.2 Roteirização com janela de tempo

O problema de roteirização com janela de tempo (PRVJT), segundo [Cordeau et al. \(2002\)](#), é considerado uma variação do problema roteamento de veículos. No PRVJT são adicionadas as janelas de tempo de atendimento aos clientes, a partir do limite inferior e superior de horas que os veículos podem atender os cliente. Em determinados problemas são admitidos que os veículos desembarquem ou embarquem nos clientes com atraso, porém são adicionadas penalizações na função objetivo para que o custo de transporte seja aumentado.

A janela de tempo é representada por  $[a_i, b_i]$ , sendo que  $a_i$  representa o momento em que veículos podem chegar nos pontos de trocas e  $b_i$  o tempo limite para estarem nos pontos de troca.

Existem outras abordagens para o problema do PRVJT, levando-se em consideração o intervalo de tempo na janela de atendimento, como [Taillard et al. \(1997\)](#) que busca flexibilizar as restrições da janela de tempo. Nesta abordagem os veículos atendem os clientes após o término da janela de atendimento, contudo, se chegar antes do início da janela de atendimento ele deve esperar pela abertura da janela de atendimento. O objetivo principal é penalizar aqueles veículos que chegarem após a janela de atendimento, com a utilização de um coeficiente de penalidade de atraso associado a cada cliente.

Já [Beham \(2007\)](#) realizou um trabalho semelhante ao de [Taillard et al. \(1997\)](#) demonstrando que caso o veículo chegue antes da janela de atendimento ele deve esperar até que ela se abra. Neste caso, uma penalidade proporcional ao atraso é inserida na função objetivo para violação do tempo de atendimento, com isso, a abordagem proposta por

Beham (2007) penaliza a violação da restrição contabilizando a diferença entre o tempo de chegada do veículo no consumidor e o tempo de fim da janela de tempo.

Abaixo seguem as restrições utilizadas no problema para incluir a janela de atendimento:

$$b_i \sum_{i \in N} x_{ijk} \leq t_{ik} \quad \forall k \in K, i \in NE | e_i = 0 \quad (17)$$

$$(b_i + lm) \sum_{j \in N} x_{ijk} \geq t_{ik} \quad \forall k \in K, i \in NE | e_i = 01 \quad (8)$$

$$[b_i - ts_i - (c_{i(i-no)/vm_k})] \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq t_{ik} \quad \forall k \in K, i \in ND | e_i = 0 \quad (19)$$

$$b_i \sum_{i \in N} x_{ijk} \geq t_{ik} \quad \forall k \in K, i \in ND | e_i = 1 \quad (20)$$

$$[b_i - ts_i - (c_{i(i+no)/vm_k})] \sum_{j \in N} x_{ijk} \geq t_{ik} \quad \forall k \in K, i \in NE | e_i = 1 \quad (21)$$

$$b_0 \geq t_{ok} \quad \forall k \in K \quad (22)$$

$$t_{2no+1k} \leq b_{2no+1} \quad \forall k \in K \quad (23)$$

$$t_{ik} \leq t_{(no+1)i} \quad \forall k \in K, i \in NE \quad (24)$$

As restrições vão garantir que os veículos atendam os serviços dentro da janela de atendimento, e que os maquinistas não sejam entregues ou recolhidos nos pontos de trocas com atraso. Para que os maquinistas sejam entregues e recolhidos no devido ponto de troca, é necessário desenvolver restrições para o problema, descritas a seguir.

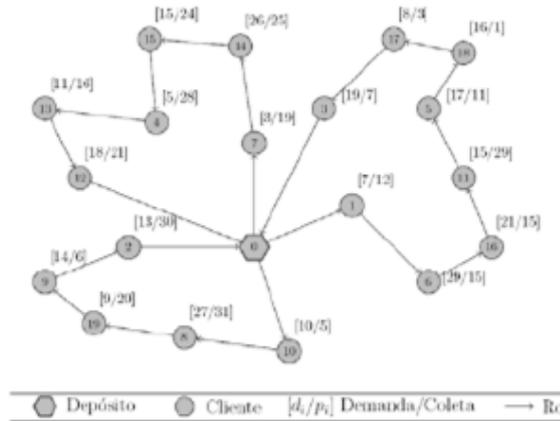
### 2.2.3 Problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultânea

O Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultânea (PRVCES) é uma das variantes do PRV clássico. Nele, um depósito é denominado como ponto de entrega e coleta, com uma frota ilimitada de veículos de capacidade  $Q$  para atendimento a um conjunto  $N$  de clientes distribuídos nos pontos de troca. Cada cliente  $i$  contido em  $N$  está associado aos dois parâmetros  $d_i$  e  $p_i$ , que representam a quantidade de maquinistas que vai ser entregue e coletado em um cliente  $i$ , respectivamente. Os veículos devem atender todas as ordens de serviço percorrendo a menor distância e atendendo às seguintes restrições:

- (a) Cada rota deve iniciar e finalizar no depósito;
- (b) Todos os clientes devem ser visitados uma única vez e por um único veículo;

- (c) As demandas por coleta e entrega de cada cliente devem ser completamente atendidas;
  - (d) A carga do veículo, em qualquer momento, não pode superar a capacidade do veículo.
- Em algumas variantes desse problema, considera-se também a necessidade de cada veículo não percorrer mais que um determinado limite de distância (tempo).

Figura 1 – Exemplo de PRVCES



Fonte: Retirado do site [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

A Figura 1 ilustra um exemplo do PRVCES. Na Figura 1, os clientes são representados pelos números 1 a 19 e o depósito pelo número 0 (zero). Cada par  $[d_i / p_i]$  representa a demanda e coleta em um cliente  $i$ , respectivamente. Nesta figura, há três rotas a serem executadas por veículos de capacidade  $Q = 150$ . Em uma das rotas, o veículo sai do depósito e atende aos clientes 10, 8, 19, 9 e 2, nesta ordem, retornando ao depósito no final. No primeiro cliente atendido nessa rota, é realizada uma entrega de 10 unidades do produto e recolhida outras 5 unidades. O último ponto que do veículo percorre é o cliente 2, no qual demanda é de 13 unidades do produto e necessita que sejam coletadas 30 unidades.

$$\text{minimizar } z = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n x_{ijk} = 1, \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} - \sum_{i=0}^n x_{jik} = 0, \quad \forall j = 0, \dots, n \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ojk} \leq 1, \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^n y_{ij} - \sum_{i=0}^n y_{ji} = p_j, \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^n z_{ij} - \sum_{i=0}^n z_{ji} = d_j, \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$y_{ij} + z_{ij} - Q \sum_{i=0}^n x_{jik} \leq 0 \quad \forall j = 0, \dots, n \quad \forall i = 0, \dots, n \quad (7)$$

A equação (1) representa a Função Objetivo do problema, procurando minimizar a distância total percorrida pelos veículos. As restrições (2) garantem que cada cliente é visitado exatamente por um único veículo. As restrições (3) estabelecem que o mesmo veículo chega e sai de cada cliente por ele servido. As restrições (4) definem que no máximo veículos serão utilizados. As restrições (5) e (6) são relacionadas ao fluxo das demandas de coleta e entrega, respectivamente, garantindo que ambas as demandas são satisfeitas para cada cliente. As restrições (7) estabelecem que as demandas de coleta e entrega só serão transportadas por arcos contidos na solução, por meio da imposição de um limite superior para o total transportado para um veículo em uma dada seção da rota.

#### 2.2.4 Problema de roteamento de veículos com janela de tempo e entrega e coleta simultânea

O Problema de roteamento de veículos com janela de tempo e entrega e coleta simultânea (PRVJTCS) é uma extensão do problema de roteamento de veículos (PRV). Segundo [Subramanian, Ochi e Cabral \(2008\)](#), a coleta e entrega simultânea de veículos corresponde a entrega e coleta de maquinistas nos pontos de troca simultaneamente, enquanto na janela de tempo a faixa de horário que os maquinistas podem ser entregues ou recolhidos nos pontos de troca. A frota de veículos utilizados no transporte dos maquinistas é homogênea, pelo fato de todos os veículos possuírem a mesma capacidade de transporte. O PRVJTCS é comum em empresas do setor ferroviário pelo fato de dependerem de veículos rodoviários para realizar o transporte de colaboradores. A janela de atendimento de entrega e coleta de maquinistas é determinada a partir do horário de apresentação dos maquinistas e o horário de circulação previsto para o trem. Já a coleta e entrega simultânea acontece para que os maquinistas não extrapolem a jornada de trabalho e os trens não fiquem sem maquinistas.

A solução do PRVJTCS é a definição das rotas que serão percorridas por cada veículo minimizando os custos totais de transporte, sendo calculado a partir da distância total percorrida pela frota de veículos. Para isso foram inseridas restrições no programa para satisfazer as necessidades reais do problema. As condições são descritas a seguir: cada rota começa e termina no depósito, cada cliente é visitado exatamente uma vez por apenas um veículo dentro da janela de atendimento, a demanda total (levando-se em conta tanto a demanda de coleta quanto de entrega) de cada rota não deve exceder a capacidade do veículo. O modelo de programação linear inteira mista desenvolvido no trabalho foi baseado

em modelos já propostos anteriormente na literatura. Com isso, foi utilizado o modelo de extensão do PRV com janela de tempo dos autores [ARENALES, ARMENTANO e MORABITO \(2015\)](#) e o modelo PRV com coleta e entrega simultânea dos autores [Montané e Galvao \(2006\)](#). No modelo utilizado, o depósito (local de apresentação dos motoristas) será representado pelos nós 0 e  $(n + 1)$ .

Na metodologia do artigo descrita abaixo, segue o modelo completo utilizado para desenvolver o problema de roteamento de veículos do artigo.

### 3 Metodologia

O problema consiste em realizar a roteirização dos veículos que realizam o transporte dos maquinistas da companhia com base na programação de circulação dos trens, apresentação dos maquinistas e horário de apresentação dos serviços de manobra. Foi proposto em uma das sedes da empresa, localizada na região do Rio Paraopeba. Abaixo são descritos os locais de origem e destino das rotas.

Na região onde a roteirização foi proposta há seis pontos de trocas de maquinistas:

- Um em que os maquinistas se apresentam para começar a jornada de trabalho;
- Três terminais de carregamento do trem;
- Um destacamento onde ocorre o auxílio dos trens;
- Um hotel onde os maquinistas descansam.

Com isso, pode-se afirmar que para os maquinistas que estiverem começando a jornada de trabalho, o ponto de origem será o ponto de apresentação ou o hotel e o ponto de destino será o terminal de carregamento ou ponto de auxílio. Já os maquinistas que estiverem terminando a jornada de trabalho terão como ponto de origem os terminais de carregamento ou auxílio e ponto de destino o hotel ou a sede. Os trens que estiverem no carregamento não possuem horário de chegada pré-definido, é gerado diariamente a programação de circulação e enviada para os operadores de escala, nela consta a previsão de chegada dos trens no terminal e o fim do carregamento. Sempre que o maquinista circular com o trem para sair com o carregamento, ele deve estar com horas de trabalho disponíveis para chegar até o ponto de abastecimento do trem, para que não extrapole sua jornada de trabalho no percurso. As horas improdutivas são aquelas que o maquinista não está gerando nenhuma atividade produtiva para a companhia, pode estar de prontidão na sede aguardando o início do serviço ou aguardando o transporte. Elas são de 60 minutos para o maquinista que está iniciando a jornada de trabalho e de 60 minutos para aqueles que estão terminando a jornada de trabalho, e para o último ela acontece quando ele está esperando o transporte para o ponto de descanso. No transporte dos maquinistas devem ser considerados uma série de restrições que irão contemplar a capacidade dos veículos, que deve ser de no máximo 4 maquinistas por viagem. A quantidade de veículos que estarão disponíveis para realizar o transporte, que podem ser negociados com a empresa responsável pelos carros, sendo que o objetivo do problema é minimizar a quantidade de veículos do transporte.

Na modelagem do problema as restrições e função objetivo foram desenvolvidas com base no artigo da autora Castro R. "Planejamento do transporte de maquinistas para atendimento às locomotivas acopladas em trens" publicado em 2018, a função objetivo

e das restrições dos problemas. Também foram utilizadas as teorias descritas acima, sendo elas o problema do caixeiro viajante e com janela de tempo com coleta e entrega simultânea. Considerando no o número de ordens de transporte e veículos a variável que contém o número total de veículo. Abaixo são descritos os parâmetros iniciais utilizados no problema:

$l_i$  = Limite de espera para o maquinista que está iniciando a jornada de trabalho.

$l_e$  = Limite de espera para o maquinista que está terminando a jornada de trabalho.

$m$  = Constante de valor elevado que ajuda na lógica do problema.

São definidos os parâmetros atrelados aos nós  $i, j$  e aos veículos  $k$ :  $c_{ij}$  = A distância em km entre o nó  $i$  e  $j$ .

$b_i$  = Início da janela de atendimento no nó  $i$ .

$c_k$  = Capacidade de transporte de cada veículo  $k$ .

$vm$  = Velocidade média em km/h de cada veículo  $k$ .

$e_i$  = Parâmetro que assume 1 quando o maquinista está iniciando a jornada de trabalho e 0 quando está terminando a escala.

$a_i$  = Parâmetro de apoio que assume o valor 1 caso seja um nó de embarque e -1 caso seja um nó de desembarque.

Abaixo seguem os conjuntos do problema:

NE = Conjunto dos nós de embarque, definido como  $NE = 1, \dots, no$

NP = Conjunto dos nós de desembarque, definido como  $NP = (no + 1), \dots, (2*no)$

NED = Conjunto dos nós de embarque e desembarque, definido como  $NED = 1, \dots, ((2*no)+1)$

N = Conjunto de todos os nós do problema, que é definido como  $N = 0, \dots, ((2*no)+1)$

NO = Conjunto dos nós de garagem, embarque e desembarque, definido como  $NO = 0, \dots, (2*no)$

N1 = Conjunto dos nós de embarque, desembarque e garagem virtual, definido como  $N1 = 1, \dots, ((2*no)+1)$

K = Conjunto dos veículos presentes na frota, definido como  $K = 1, \dots, \text{veículos}$

E finalmente, são definidas as variáveis de decisão do problema matemático:

$x_{ijk}$  = Variável binária que assume 1 quando o veículo utiliza a rota do nó  $i$  ao  $j$  e 0 quando a rota não é utilizada.

$t_{ik}$  = Variável com valor maior que zero e representa o instante de tempo que o veículo  $k$  começa a atender o nó  $i$ .

$q_{ik}$  = Variável que representa o total de assentos ocupados no veículo  $k$  após ele passar pelo nó  $i$ .

A função objetivo é a minimização do custo de transporte dos veículos, que pode ser representado pela soma dos quilômetros percorridos por cada carro e o custo fixo de utilização. Nela são considerados apenas os carros que foram utilizados durante a rota, sendo atribuído um custo fixo para cada carro utilizado no mês, assim como o custo por

quilômetro percorrido.

$$\text{minimizar}(\sum_{i=1}^N N, \sum_{j=1}^N, \sum_{k=1}^K c_{ij}x_{ijk} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{NE} cv_k x_{0jk}) \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in NE} x_{0jk} \geq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in NE} x_{0jk} \leq 1 \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in NE \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in ND \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} - \sum_{j \in N} x_{jik} = 0 \quad \forall k \in K, i \in NE \quad (6)$$

$$\sum_{j \in NE} x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{j \in NE} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} x_{0(2no+1)k} \leq \text{veiculos} \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{j \in N | i \neq j} x_{jik} - \sum_{j \in N | i \neq j} x_{ijk} = 0 \quad \forall k \in K, i \in NDE \quad (10)$$

$$q_{jk} \geq q_{ik} + a_j x_{ijk} - m(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K, i \in NO, j \in N1 \quad (11)$$

$$ck_k \sum_{j \in N} x_{ijk} \geq q_{ik} \quad \forall k \in K, i \in N \quad (12)$$

$$q_{ok} = 0 \quad \forall k \in K \quad (13)$$

$$q_{(2no+1)k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (14)$$

$$t_{jk} \geq t_{ik} + (c_{ij}/vm_k)ts_i x_{ijk} - m(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K, i \in NO, j \in N1 \quad (15)$$

$$x_{iik} = 0 \quad \forall k \in k, i \in N \quad (16)$$

$$b_i \sum_{i \in N} x_{ijk} \leq t_{ik} \quad \forall k \in k, i \in NE | e_i = 0 \quad (17)$$

$$(b_i + lm) \sum_{j \in N} x_{ijk} \geq t_{ik} \quad \forall k \in k, i \in NE | e_i = 01 \quad (8)$$

$$[b_i - ts_i - (c_{i(i-no)/vm_k})] \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq t_{ik} \quad \forall k \in K, i \in ND | e_i = 0 \quad (19)$$

$$b_i \sum_{i \in N} x_{ijk} \geq t_{ik} \quad \forall k \in K, i \in ND | e_i = 1 \quad (20)$$

$$[b_i - ts_i - (c_{i(i+no)/vm_k})] \sum_{j \in N} x_{ijk} \geq t_{ik} \quad \forall k \in K, i \in NE | e_i = 1 \quad (21)$$

$$b_0 \geq t_{ok} \quad \forall k \in K \quad (22)$$

$$t_{2no+1k} \leq b_{2no+1} \quad \forall k \in K \quad (23)$$

$$t_{ik} \leq t_{(no+1)i} \quad \forall k \in K, i \in NE \quad (24)$$

$$x_{j0k} = 0 \quad \forall k \in K, j \in N \quad (25)$$

As restrições (2) determinam que devem ser usados pelo ou menos um veículo nas rotas e as (3) que devem ser usados no máximo o número de veículos disponíveis na resolução do problema. As restrições (4) garantem que todas as requisições devem ser atendidas e as (5) que todos os maquinistas devem desembarcar.

Já as restrições (6) asseguram que o mesmo veículo faça o embarque e o desembarque do maquinista de uma mesma requisição. As restrições (7) garantem que cada veículo inicie a rota em um nó de embarque ou não seja utilizado. As restrições (8) asseguram que um veículo nunca pode iniciar a rota em um nó de desembarque. Já as restrições (9) garantem que cada veículo só pode retornar a garagem virtual a partir de um nó de desembarque. As restrições (10) tem o objetivo de assegurar o fluxo de continuidade do problema. As restrições (11) calculam a capacidade de cada veículo  $k$  e a restrições (12) asseguram que a capacidade dos carros não seja ultrapassada. As restrições (13) garantem que cada veículo deve começar a rota sem maquinista, já as (14) que devem terminar a rota sem maquinistas.

Nas restrições (15) calculam o tempo que o veículo chega no nó  $j$  e armazenado na variável  $t$ , já as restrições (16) asseguram que o nó destino não seja o nó de origem do veículo. As restrições (17) garantem que para o maquinista que está terminando a escala, o carro deve chegar no ponto de troca depois do trem chegar, para que assim, as horas improdutivas do maquinista sejam minimizadas. Já as restrições (18) garantem que para o maquinista que está terminando a escala, o carro deve chegar no ponto de troca depois do trem chegar e antes do limite máximo delimitado no modelo matemático. As restrições (19) asseguram que para aqueles que encerram a escala, que o instante de chegada no ponto de descanso deve ser igual ou maior que o horário de chegada do trem mais o tempo de embarque no veículo mais o tempo de percurso até o ponto de descanso. Já as restrições (20) garantem que para aqueles maquinistas que estão iniciando a escala o

instante de entrada no veículo no ponto de descanso para iniciar a viagem até o ponto de troca, deve ser menor ou igual ao instante de chegada do trem menos o tempo de embarcar no veículo menos o tempo de viagem entre o ponto de embarque até o ponto de troca. Já as restrições (21) garantem que o veículo saia da garagem respeitando o limite máximo estabelecido de início de rota e terminem a viagem dentro do limite estabelecido de fim de rota. As restrições (22) asseguram que o veículo saia do último ponto dentro do limite máximo estabelecido de início de rota e terminem a viagem dentro de um limite máximo estabelecido de fim de rota. Já as restrições (23) garantem que o instante de embarque do maquinista seja menor que o instante de desembarque do mesmo maquinista. As restrições (24) garantem que o instante de embarque do maquinista seja menor que o seu instante de desembarque. Já as restrições (25) asseguram que nenhum veículo retorne para a garagem e as (26) garantem que a rota não seja iniciada pela garagem virtual.

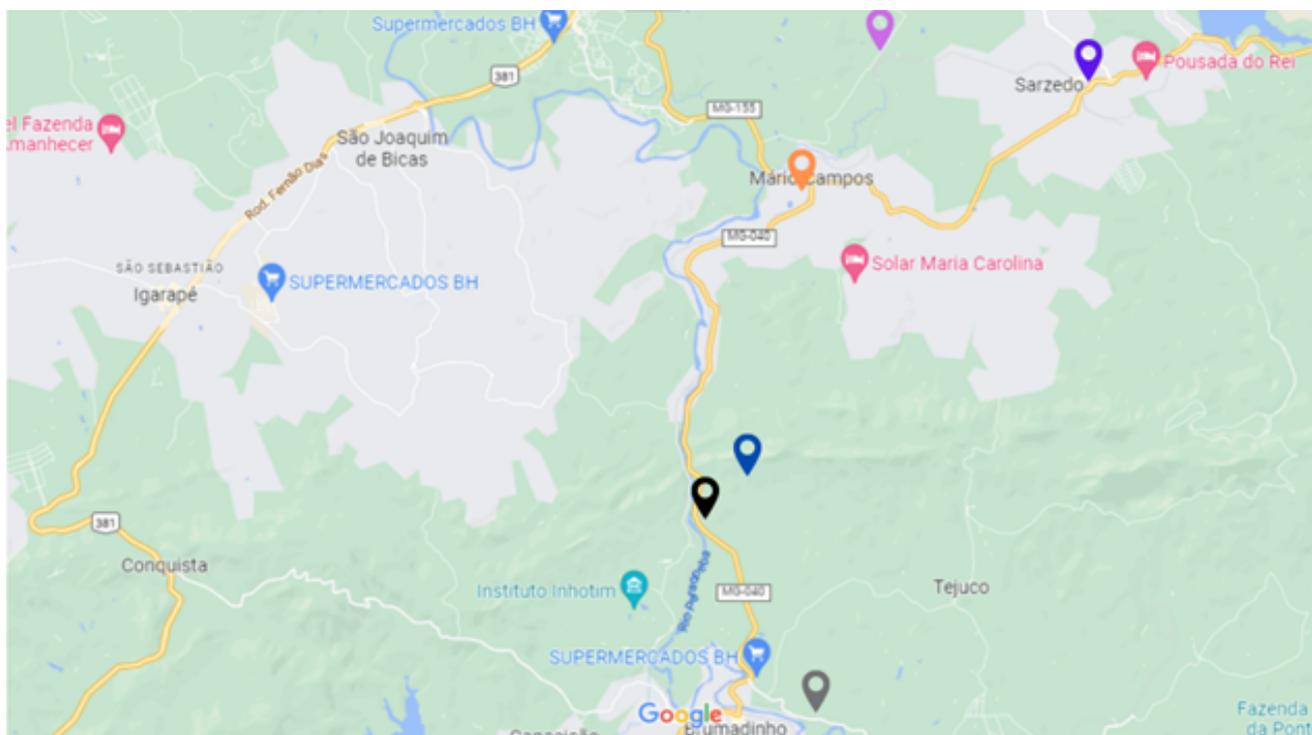
## 4 Apresentação e discussão dos resultados

O OR-Tools foi utilizado para desenvolver o programa que realiza a roteirização dos veículos. O Ortools é um software open source para problemas de otimização que permite o uso de outros “solvers” além do solver da google, como por exemplo o Gurobi. Além do Python, temos as versões para Java, C++ e C.. O programa desenvolvido nesse artigo foi escrito utilizando linguagem Python, com utilização de funções para simplificar a resolução dos problemas e , com isso, reduzir o tempo de processamento para que a implementação do projeto seja viável.

O programa foi utilizado em um computador com 8 GB de memória Ram e 1000 GB de HD com um processador Intel Core I5 (8<sup>a</sup> geração) 6 MB de cache 4 núcleos e 8 threads – de 1.60 GHz até 3.90 GHz. Pode ser utilizado para resolver problemas de roteirização em diversos formatos com tempo de processamento baixo, sendo que no projeto desenvolvido foi obtido resposta viável com 3 segundos de processamento. Os parâmetros utilizados no desenvolvimento da roteirização foram obtidos através da programação de maquinistas, enviada pelos programadores de equipagem dos trens e contemplando o período de 4:00 até as 17:00.

Foram realizadas comparações entre o planejamento dos veículos desenvolvido pelos operadores de escala e pelo programa de roteirização desenvolvido nesse artigo para verificar os ganhos que a implementação do projeto pode trazer para a companhia. A programação dos operadores de escala pode ser obtida através da passagem de serviço dos motoristas, nela consta os pontos em que eles realizaram trocas de maquinistas e o horário de chegada e saída, com isso, é possível traçar as rotas que todos os carros realizaram ao longo do dia e a distância percorrida. Os ganhos serão obtidos através da redução da quilometragem percorrida, pontualidade na entrega dos maquinistas e redução na quantidade de carros utilizados.

Figura 2 – Mapa Paraopeba



Fonte: Google Maps.

A figura 2 representa um mapa desenvolvido no software Google Maps com todas os pontos em que os carros realizam as trocas de maquinistas na sede do Paraopeba, onde a roteirização foi desenvolvida. Abaixo segue a identificação de cada ponto de acordo com a cor:

- Cinza: Quilometro 575 (FCC)
- Preto: Terminal de Souza Noscheze (FSN)
- Azul: Pousada de descanso para os maquinistas que estão viajando (Hotel)
- Laranja: Sede de Mário Campos (FMC)
- Roxo: Terminal de Sarzedo Novo (FZN)
- Azul escuro: Terminal de Sarzedo Velho (FSO)

Abaixo segue a tabela com a distância, em quilômetros, e tempo de deslocamento, em minutos, entre cada ponto:

Figura 3 – Tabela distância e tempo de deslocamento

ORIGEM	DESTINO	TEMPO DE DESLOCAMENTO	DISTÂNCIA EM KM
FMC	FZN	28	4,5
FMC	FSN	34	8,2
FMC	HOTEL	37	10,5
FMC	FCC	55	16,9
FZN	FCC	72	2,7
FSN	FCC	26	8,6
FCC	FHL	138	62,8
FHL	HOTEL	111	56,5
FSN	FHL	108	54,2
FSN	FZN	45	12,1
FCC	HOTEL	36	6,5
FMC	FHL	78	46,6
FSN	HOTEL	10	2,3
FZN	FHL	90	42,3
FMC	FSO	17	7,9
HOTEL	FSO	39	18
FZN	FSO	31	11,9
FCC	FSO	51	23,9
FHL	FSO	55	35,8
FSN	FSO	33	15,7
HOTEL	FZN	24	14,4

Fonte: O próprio autor

Na resolução dos dois planos de transporte foram utilizados 3 veículos para realizar as ordens de deslocamento, com capacidade para transportar quatro maquinistas. Hoje, a empresa possui 6 veículos para realizar o transporte da região do Paraopeba e Barreiro e o operador de escala define quantos serão utilizados em cada sede de acordo com a demanda de serviços no dia.

Foi considerada uma margem de erro, multiplicando o tempo de deslocamento entre os pontos por 1.5, para contemplar eventuais atrasos entre no trajeto. Nos modelos, a coluna denominada como “Saída” é o horário que o carro saiu do ponto de origem, “Chegada” o horário que o carro chegou no ponto de destino e o “Origem” e “Destino” os pontos de troca dos maquinistas. Abaixo segue o plano de transporte dos maquinistas desenvolvido pelo programa de roteirização, com a distância percorrida entre todos os pontos, horário de saída e chegada do ponto:

Figura 4 – Percurso Carro 1

<b>CARRO 1</b>				
<b>Origem</b>	<b>Destino</b>	<b>Saída</b>	<b>Chegada</b>	<b>Distância</b>
FMC	FSN	2:46	3:30	8.2
FSN	HOTEL	4:20	4:30	2.3
HOTEL	FZN	4:32	5:20	14.4
FZN	FMC	5:20	5:48	4.5
FMC	FCC	14:30	15:25	16.9
FCC	FMC	15:26	16:21	16.9
SOMA				63.2

Fonte: O próprio autor

Figura 5 – Percurso Carro 2

<b>CARRO 2</b>				
<b>Origem</b>	<b>Destino</b>	<b>Saída</b>	<b>Chegada</b>	<b>Distância</b>
FMC	FSN	6:30	7:04	8.2
FSN	FCC	7:05	7:31	8.6
FCC	FMC	7:32	8:27	16.9
FMC	FSO	12:43	13:00	7.9
FSO	FZN	13:02	13:33	11.9
FZN	FMC	14:00	14:28	4.5
SOMA				58

Fonte: O próprio autor

Figura 6 – Percurso Carro 3

<b>CARRO 3</b>				
<b>Origem</b>	<b>Destino</b>	<b>Saída</b>	<b>Chegada</b>	<b>Distância</b>
FMC	FZN	6:30	6:58	4.5
FZN	FBR	14:00	14:48	14.4
FBR	FMC	14:48	15:25	10.5
SOMA				29.4

Fonte: O próprio autor

Abaixo segue o plano de transporte de maquinistas desenvolvido pelos operadores de escala:

Figura 7 – Percurso Carro 1

<b>Carro 1</b>				
<b>Origem</b>	<b>Destino</b>	<b>Saída</b>	<b>Chegada</b>	<b>Distância</b>
FMC	HOTEL	3:31	4:02	10.5
HOTEL	FMC	4:05	4:26	10.5
FMC	FZN	4:42	4:56	4.5
FZN	FMC	5:04	5:26	4.5
FMC	FZN	5:48	6:00	4.5
FZN	FMC	6:01	6:29	4.5
FMC	FSO	10:50	11:18	7.9
FSO	FMC	11:19	11:48	7.9
FMC	FSN	13:00	13:40	8.2
FSN	FMC	13:48	14:05	8.2
Soma				71.2

Fonte: O próprio autor

Figura 8 – Percurso Carro 2

<b>Carro 2</b>				
<b>Origem</b>	<b>Destino</b>	<b>Saída</b>	<b>Chegada</b>	<b>Distância</b>
FMC	FSN	4:17	4:27	8.2
FSN	POUSADA	5:48	5:58	2.3
POUSADA	FMC	5:58	6:23	10.5
FMC	FCC	6:50	7:37	16.9
FCC	FMC	7:44	8:20	16.9
FMC	FZN	9:04	9:18	4.5
FZN	FMC	9:22	9:35	4.5
FMC	FSO	11:24	11:40	7.9
FSO	FMC	11:43	12:16	7.9
FMC	FZN	13:26	13:42	4.5
FZN	FMC	13:50	14:05	4.50
Soma				88.6

Fonte: O próprio autor

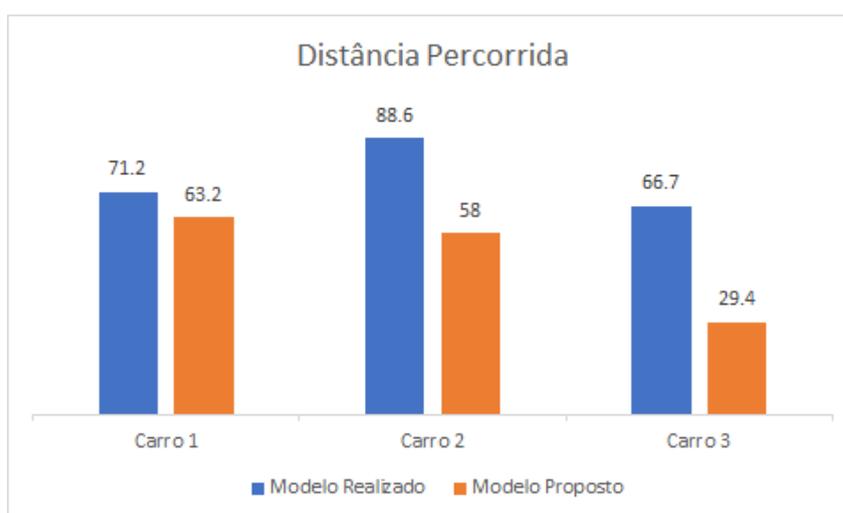
Figura 9 – Percurso Carro 3

Carro 3				
Origem	Destino	Saída	Chegada	Distância
FMC	FZN	8:07	8:21	4.5
FZN	FMC	8:21	8:36	4.5
FMC	FSN	9:01	9:35	8.2
FSN	FMC	9:07	9:40	8.2
FMC	FCC	12:58	14:45	16.9
FCC	FZN	14:48	15:25	19.9
FZN	FMC	15:26	15:42	4.5
Soma				66.7

Fonte: O próprio autor

Foram utilizados três veículos nos dois planos de transporte, sendo que todos os maquinistas desembarcaram nos pontos de trocas no horário determinado pela programação de equipagem. Os motoristas dos carros devem realizar a intrajornada (uma hora de descanso) na jornada de trabalho nos pontos de troca. As oportunidades de realização estão no intervalo dos deslocamentos de um ponto ao outro, atendendo aos horários de chegada dos maquinistas, e nos modelos houveram intervalos com duração igual ou superior a uma hora disponíveis para que os motoristas realizassem a intrajornada.

Figura 10 – Quilômetros Percorridos



Fonte: O próprio autor

A figura 10 representa a soma de quilômetros percorridos por todos os veículos nos dois métodos de programação. A programação proposta economizou 75,9 quilômetros e 33,5% de melhora na comparação com o modelo atual de programação. Na comparação

de melhora de cada veículos foi obtido o seguinte resultado: Veículo 1 de 11,23%, Veículo 2 de 34,53% e no Veículo 3 de 55,92%, demonstrando que todos os carros reduziram a quantidade de quilômetros percorridos, com destaque para o veículo 3 que obteve margens expressivas de ganho.

Toda a melhoria citada acima gera economia no consumo de combustível, manutenção dos veículos e propondo previsibilidade na realização das rotas. O modelo de veículo utilizado para o transporte de maquinistas são o Renault Logan e de acordo com dados do site da Localiza possui consumo médio de 14 quilômetros por litro na cidade utilizando a gasolina, com isso, pode-se afirmar que com a programação proposta a empresa teria uma economia média de 5 litros de combustível por dia. Segundo reportagem do jornal Estado de Minas o valor do litro de gasolina na cidade de Belo Horizonte no mês de setembro de 2022 é de R\$ 5,33 , multiplicando o valor do combustível pela economia é possível constatar que foi de R\$ 26,65 no turno da roteirização.

Mensalmente o projeto gera economia de R\$ 799,50 , considerando o mês de 30 dias, e anualmente a economia pode chegar a R\$ 9.564. Se for considerado a implementação do projeto em todas as sedes que possuem apresentação de maquinistas em Minas Gerais, sendo 7 sedes, o projeto pode gerar até R\$ 67.158 anualmente.

A oportunidade de ganho mais expressiva com a implementação do projeto é a diminuição de veículos que estão realizando as rotas, já que a empresa contratante pode retirar e adicionar carros de acordo com a demanda de serviço. O custo mensal de um veículo para a empresa ferroviária gira em torno de R\$ 23.000, custo maior quando comparado ao de quilômetros percorridos pelos carros. Porém, existe o desafio de realizar todos os serviços dentro do tempo previsto com a quantidade de veículos reduzidos, e a redução de veículos faria com que a empresa ficasse mais exposta a eventuais imprevistos.

## 5 Conclusões e considerações finais

A partir das informações obtidas na apresentação dos resultados, conclui-se que a implementação do projeto de roteirização dos veículos gerou benefícios para a empresa ferroviária. O primeiro citado foi o financeiro a partir da redução da distância percorrida pelos veículos, que pode aumentar devido à redução na quantidade de carros alugados com a empresa responsável pelo transporte dos maquinistas. Pela programação obtida pelos carros foi constatado que o carro 3 percorreu 52% quilômetros a menos, quando comparado à média dos outros carros. A partir de adequações nos horários de apresentação dos maquinistas e dos trens, seria possível reduzir um carro na utilização diária da sede, possibilitando a redução de R\$20.000,00 mensais de custos logísticos.

Outro benefício gerado pela implementação do modelo de roteirização é a diminuição da carga mental de trabalho dos operadores de escala, no modelo atual eles realizam a roteirização utilizando o conhecimento prévio e raciocínio, porém já possuem uma série de demandas ao longo do dia, como: conversar no telefone, realizar digitações com os dados da jornada de trabalho dos maquinistas, reservas nos hotéis para os maquinistas que estão viajando e pedido de refeição. Com o algoritmo é possível que a programação seja gerada a partir dos parâmetros disponibilizados a partir da programação de equipagem, sendo necessário que o operador de escala realize os ajustes de acordo com variações no tempo de deslocamento dos veículos, absenteísmo, ocorrências ferroviárias, variações no tempo de carregamento e descarga dos trens.

O algoritmo que desenvolve a roteirização dos veículos obteve resposta viável com 3 segundos de processamento, contudo, para tratar os dados fornecidos pela programação de equipagem e transforma-los nos parâmetros do problema foi gasto uma hora. Pelo fato de a programação de equipagem ser enviada de 3 em 3 horas, será necessário realizar o tratamento dos dados 4 vezes ao dia, aumentando as demandas do operador de escala. A redução no tempo de tratamento dos dados é vital para a implementação do projeto e será o principal desafio do projeto, deverão ser agendadas reuniões com a programação de equipagens com o objetivo de adequar os parâmetros da programação de equipagem com os parâmetros da roteirização, para que o programa processe os dados automaticamente.

## Referências

- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R. *YANASSE HH Pesquisa Operacional para cursos de engenharia*. [S.l.]: Elsevier, 2015.
- BEHAM, A. Parallel tabu search and the multiobjective capacitated vehicle routing problem with soft time windows. In: SPRINGER. *International Conference on Computer Aided Systems Theory*. [S.l.], 2007. p. 829–836.
- CHRISTOPHER, M. *Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Cost and Improving Service Financial Times: Pitman Publishing. London, 1998 ISBN 0 273 63049 0 (hardback) 294+ 1× pp*. [S.l.]: Taylor & Francis, 1999.
- CORDEAU, J.-F. et al. A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research society*, Springer, v. 53, n. 5, p. 512–522, 2002.
- GOMES, C. F. S.; RIBEIRO, P. C. C. *Gestão da cadeia de suprimentos integrada à tecnologia da informação*. [S.l.]: Editora Senac Rio, 2020.
- LAPORTE, G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European journal of operational research*, Elsevier, v. 59, n. 3, p. 345–358, 1992.
- MONTANÉ, F. A. T.; GALVAO, R. D. A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 33, n. 3, p. 595–619, 2006.
- MOREIRA, D. A. *PESQUISA OPERACIONAL-CURSO INTRODUTÓRIO*. [S.l.]: Cengage Learning Edições Ltda., 2010.
- NETO, E. S. F. *Roteirização de veículos de carga utilizando a experiência do operador*. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2005.
- NOGUEIRA, C. W.; GONÇALVES, M. B.; NOVAES, A. G. Logística humanitária e logística empresarial: relações, conceitos e desafios. In: *Anais do XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Rio de Janeiro*. [S.l.: s.n.], 2007.
- SUBRAMANIAN, A.; OCHI, L. S.; CABRAL, L. An efficient iterated local search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Proc. of the XL SBPO (CD-ROM)*, p. 1569–1580, 2008.
- TAILLARD, É. et al. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows. *Transportation science*, INFORMS, v. 31, n. 2, p. 170–186, 1997.
- VELÁZQUEZ, F. F. et al. *Manual de ergonomia*. [S.l.]: Fundación MAPFRE, 1995.