



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e  
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)  
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)  
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

**Dissertação**

**ROTEAMENTO DE COMBOIOS DE COMBUSTÍVEL PARA ABASTECIMENTO DE  
EQUIPAMENTOS DE MINA**

**Renan Portela de Souza**

**Ouro Preto  
Minas Gerais, Brasil  
2023**

**Renan Portela de Souza**

**ROTEAMENTO DE COMBOIOS DE COMBUSTÍVEL PARA ABASTECIMENTO DE  
EQUIPAMENTOS DE MINA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Luciano Perdigão Cota,  
D.Sc.

Ouro Preto  
2023

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729r Souza, Renan Portela de.  
Roteamento de comboios de combustível para abastecimento de equipamentos de mina. [manuscrito] / Renan Portela de Souza. - 2023.  
42 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Perdigão Cota.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Minerais.

1. Veículos - Rota. 2. Levantamento de rota - Comboios de combustível. 3. Programação Linear. 4. Otimização combinatória - Algoritmo meta-heurístico. 5. Minas e recursos minerais. I. Cota, Luciano Perdigão. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
PROGR. POS GRAD. PROF. INST. CONT. E AUT.  
PROCESSOS DE MIN.



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Renan Portela de Souza**

### **Roteamento de comboios de combustível para abastecimento de equipamentos de mina**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração  
Aprovada em 21 de junho de 2023

#### Membros da banca

Doutor - Luciano Perdigão Cota - Orientador - Instituto Tecnológico Vale  
Doutor - Gustavo Pessin - Instituto Tecnológico Vale  
Doutor - Frederico Gadelha Guimarães - Universidade Federal de Minas Gerais

Luciano Perdigão Cota, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 28/08/2023



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Nazário Coelho, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INST. CONTROLE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO**, em 13/09/2023, às 22:51, 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 **0588862** e o código CRC **66CAA096**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.012321/2023-49

SEI nº  
0588862

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163  
Telefone: (31)3552-7352 - [www.ufop.br](http://www.ufop.br)

# Agradecimentos

A minha mãe, Dulce Portela, e meu pai, Waldeci Loiola, que são para mim símbolos de cuidado, perseverança, carinho, resiliência, dignidade, dedicação e amor.

A minha esposa Raymara Ferreira, cujo apoio incondicional e presença constante foram fundamentais ao longo desta jornada de mestrado. Seu incentivo e compreensão, foram a âncora que me sustentou em todos os momentos. Obrigado por ser minha fonte de inspiração e por compartilhar essa realização comigo.

Aos demais familiares, pelo incentivo e reconhecimento.

Aos meus amigos que sempre estiveram dispostos a me ajudar e incentivar no decorrer desta jornada.

Quero expressar minha sincera gratidão ao meu orientador, Luciano Cota, cujo apoio inestimável foi essencial para a conclusão deste trabalho. Suas ideias brilhantes, dedicação incansável e orientação direcionada foram os alicerces que possibilitaram a finalização deste projeto. Sua presença e comprometimento foram fundamentais para que cada etapa fosse vencida com confiança e clareza.

Ao Natanael Coutinho e Diego Dinarte pela amizade, dedicação e especialmente pelos conhecimentos compartilhados.

A todos vocês meus sinceros agradecimentos. Vocês me ajudaram a tornarem um sonho em realidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

*“A motivação é o combustível  
necessário para atingir seus  
objetivos.”  
(Zig Ziglar)*

## Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

### ROTEAMENTO DE COMBOIOS DE COMBUSTÍVEL PARA ABASTECIMENTO DE EQUIPAMENTOS DE MINA

Renan Portela de Souza

Junho/2023

Orientador: Luciano Perdigão Cota

Em complexos mineradores de grande porte, os equipamentos em operação estão dispostos em uma extensa região geográfica e alguns destes equipamentos possuem restrições de locomoção, como escavadeiras, tratores e perfuratrizes. Por conta destas limitações, estes equipamentos necessitam de abastecimento nos seus locais de operação, por meio de caminhões tanque com infraestrutura de abastecimento, chamados comboios de combustível. Neste estudo é tratado o problema de roteamento destes comboios de combustível com o objetivo de minimizar a maior rota. Para resolvê-lo em instâncias de pequeno porte, foi proposta uma formulação de programação linear inteira mista. Para tratar instancias de grande porte foi proposto um algoritmo meta-heurístico baseado no *Iterated Local Search*, que utiliza um algoritmo, chamado TPA, para a alocação e posicionamento de viagens. O algoritmo meta-heurísticos foi validado através de um estudo de caso real do Complexo de Carajás, coletado em maio de 2023, com 61 equipamentos de mina a serem abastecidos e 8 comboios de combustível. O algoritmo meta-heurístico encontrou uma boa solução rapidamente, mostrando-se uma ferramenta valiosa para apoio na tomada de decisão.

**Palavras-chave:** Roteamento de veículos, Comboios de combustível, Programação Linear Inteira Mista, Algoritmo meta-heurístico, Mineração.

**Macrotema:** Mina; **Linha de Pesquisa:** Tecnologias da Informação, Comunicação e Automação Industrial; **Tema:** Aumento de produtividade na cadeia de transporte; **Área Relacionada da Vale:** Serra Norte - Complexo Minerador de Carajás.

## **Abstract**

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

### ROUTING OF FUEL CONVOYS TO SUPPLY MINE EQUIPMENT

Renan Portela de Souza

June/2023

Advisor: Luciano Perdigão Cota

In large-scale mining complexes, operational equipment is allocated across a vast geographic region, and some of these equipment mobility restrictions as excavators, tractors, and drills. Due to these limitations, these mining equipment require refueling at their operation sites through fuel trucks equipped with refueling infrastructure, known as fuel convoys. This study addresses the problem of routing these fuel convoys to minimize the longest route. To find a solution to this problem, a mixed-integer linear programming formulation was proposed to address a simplified version of the problem. To handle large instances, a metaheuristic algorithm based on Iterated Local Search was proposed, along with a new algorithm for trip allocation and positioning. These approaches were validated using a case study from Carajás Complex, collected in May 2023, involving up to 61 mining equipment and eight fuel convoys. The metaheuristic algorithm quickly found a good solution, proving to be an efficient tool for decision-making.

**Keywords:** Vehicle Routing Problem, Mixed-Integer Linear Programming, Metaheuristic Algorithm, Mining.

**Macrotheme:** Plant; **Research Line:** Information Technologies, Communication and Industrial Automation; **Theme:** Increased productivity in the transport chain; **Related Area of Vale:** Serra North - Carajás Mining Complex.

# Lista de Figuras

Figura 1.1	Cava de minério de ferro do Complexo Carajás. Fonte: Autor. . . . .	11
Figura 1.2	Comboio de 30.000 litros adaptado para abastecimento de equipamentos em campo. . . . .	12
Figura 2.1	Matriz de tempo de viagem (minutos). Fonte: Autor. . . . .	16
Figura 5.1	Representação de uma solução. Fonte: Autor. . . . .	28
Figura 6.1	Rota gerada para o comboio CB6B13 na mina de Carajás. . . . .	37

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Exemplo de solução. . . . .	16
Tabela 4.1	Características dos equipamentos para abastecimento. . . . .	23
Tabela 4.2	Características dos comboios. . . . .	24
Tabela 4.3	Resultados encontrados pelo modelo matemático. . . . .	24
Tabela 4.4	Rotas para a Instância 01. . . . .	25
Tabela 4.5	Rotas para a Instância 02. . . . .	25
Tabela 4.6	Rotas para a Instância 03. . . . .	25
Tabela 4.7	Informações dos abastecimentos a serem realizados na Instância 1. . . . .	26
Tabela 4.8	Informações dos abastecimentos a serem realizados na Instância 2. . . . .	26
Tabela 4.9	Informações dos abastecimentos a serem realizados na instância 3. . . . .	27
Tabela 6.1	Características dos equipamentos para abastecimento. . . . .	36
Tabela 6.2	Características dos comboios. . . . .	37
Tabela 6.3	Resultados do algoritmo proposto para o estudo de caso. . . . .	37

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>11</b>
1.1	Contextualização . . . . .	11
1.2	Motivação . . . . .	12
1.3	Objetivos . . . . .	12
1.3.1	Objetivo Geral . . . . .	13
1.3.2	Objetivos Específicos . . . . .	13
1.4	Contribuições do Trabalho . . . . .	13
1.5	Organização do Trabalho . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Caracterização do problema</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>Revisão bibliográfica</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>Modelo matemático proposto</b>	<b>19</b>
4.1	Conjuntos, parâmetros e variáveis . . . . .	19
4.2	Formulação linear inteira mista . . . . .	20
4.3	Validação do modelo matemático . . . . .	22
4.3.1	Cálculo do limite superior para a quantidade de combustível a ser abastecido ( <i>Big M</i> ) . . . . .	22
4.3.2	Conjunto de instâncias avaliadas . . . . .	23
4.3.3	Resultados . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Algoritmo meta-heurístico proposto</b>	<b>28</b>
5.1	Representação da solução . . . . .	28
5.2	Algoritmo de posicionamento de viagens e avaliação da solução . . . . .	28
5.3	Algoritmo meta-heurístico . . . . .	30
5.4	Algoritmo construtivo . . . . .	32
5.5	Algoritmo de busca local . . . . .	33
5.6	Algoritmo de perturbação . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Estudo de caso</b>	<b>35</b>
6.1	Instância utilizada . . . . .	35

6.2 Resultados . . . . .	35
<b>7 Conclusões</b>	<b>38</b>
<b>8 Trabalhos futuros</b>	<b>40</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>41</b>

# 1. Introdução

## 1.1. Contextualização

A Vale S.A descobriu sua primeira jazida de minério de ferro na região de Carajás no estado do Pará, em 1967. Após 18 anos, a empresa iniciou as suas operações em Carajás (VALE, 2022). Nascia então, o Projeto Ferro Carajás, com reservas estimadas em 18 bilhões de toneladas e teor médio de 66,13% de ferro. O Projeto Ferro Carajás é dividido em quatro grandes jazidas: Serra Norte (ou Complexo Carajás), Serra Sul, Serra Leste e Serra São Felix. A seguir, na Figura 1.1, ilustra-se uma cava de minério de ferro do Complexo Carajás.



Figura 1.1: Cava de minério de ferro do Complexo Carajás. Fonte: Autor.

Atualmente a operação no Complexo Carajás é realizada diariamente por mais de 285 ativos de grande porte, composto por caminhões fora de estrada, escavadeiras, carregadeiras, perfuratrizes, tratores, dentre outros. O diesel é o principal combustível utilizado nestes ativos. Devido à extensa região geográfica do Complexo Carajás e à restrição de locomoção de alguns ativos de grande porte, é necessário que eles sejam abastecidos nos seus locais de operação. Os ativos que são abastecidos nos locais de operação são as escavadeiras, carregadeiras, perfuratrizes e tratores. Já os caminhões fora estrada realizam o abastecimento em postos de combustível fixos existentes no complexo.

O abastecimento dos ativos é realizado nos locais de operação por meio de caminhões tanque, também chamados comboios de combustível, que possuem toda a infraestrutura necessária para abastecimento em campo. Desta maneira, os comboios operam como postos de combustível móveis. A Figura 1.2 ilustra um comboio de combustível do Complexo Carajás com capacidade de transportar 30.000 litros de diesel.

Os comboios operam em turnos e, atualmente, o roteamento destes veículos é realizado por uma equipe de planejamento de maneira manual, por meio da estratégia de tentativa e erro. Inicialmente, a equipe coleta as informações dos ativos que devem ser abastecidos em campo no próximo turno, baseado na medição de combustível destes ativos. Por meio da quantidade



Figura 1.2: Comboio de 30.000 litros adaptado para abastecimento de equipamentos em campo.  
Fonte: Autor.

de combustível e do consumo de cada ativo, calcula-se a janela de tempo para abastecimento. Com a identificação da localização dos ativos e o cálculo da janela de tempo de abastecimento, realiza-se o planejamento de rotas para os comboios disponíveis para operar próximo turno. Neste problema busca-se gerar rotas balanceadas para os comboios disponíveis. Portanto, trata-se de um problema de roteamento de veículos capacitado com janelas tempo.

## 1.2. Motivação

Este estudo aborda o problema de roteamento de comboios de combustível para abastecimento de equipamentos do Complexo Carajás, a maior operação de mineração de minério de ferro do mundo. Atualmente, o roteamento é realizado de forma manual, resultando em ineficiências operacionais, atrasos e aumento dos custos. Assim, é necessário otimizar esse processo visando melhorar a eficiência, reduzir os custos operacionais e aumentar a produtividade.

O roteamento eficiente destes comboios é um desafio, considerando a quantidade de ativos, a diversidade de locais de operação e as restrições de locomoção. Otimizar o roteamento dos comboios de combustível se torna essencial para garantir um abastecimento adequado dos equipamentos, minimizando o tempo de deslocamento, otimizando o consumo de combustível e evitando atrasos na operação por falta de abastecimento.

## 1.3. Objetivos

Nesta seção são apresentados os objetivos deste trabalho.

### **1.3.1. Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de suporte a decisão que pode ser utilizado como ferramenta de apoio para o roteamento dos comboios de combustível que abastecem equipamentos de mina.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos listados abaixo permitem o alcance do objetivo geral:

- Estudar trabalhos da literatura que tratam do problema de roteamento de veículos com janelas de tempo;
- Analisar e estudar técnicas de solução de problemas de otimização;
- Caracterizar o problema em estudo;
- Propor uma formulação matemática para resolver instâncias de pequeno porte;
- Desenvolver um algoritmo meta-heurístico para tratar instâncias de grande porte;
- Validar o algoritmo proposto utilizando um estudo de caso do Complexo Carajás.

## **1.4. Contribuições do Trabalho**

A seguir é listada as contribuições geradas durante a execução deste trabalho:

1. Artigo publicado no XXIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2022), realizado em Fortaleza, Brasil  
  
Título: Roteamento de comboios de combustível para abastecimento de equipamentos de mina em campo: Um estudo de caso  
  
Autores: Renan Portela Souza, Natanael Salgado Coutinho, Luiz Carlos Alves Coutinho e Luciano Perdigão Cota
2. Caracterização do problema em estudo;
3. Modelo de programação linear inteira mista para resolver instâncias de pequeno porte;
4. Algoritmo baseado na meta-heurística ILS para tratar instâncias de grande porte;
5. Protótipo de um sistema de suporte à decisão para o roteamento de comboios de combustível.

## 1.5. Organização do Trabalho

Os capítulos restantes estão organizados como segue:

- **Capítulo 2 - Caracterização do Problema:** Neste capítulo, o problema objeto de estudo é caracterizado;
- **Capítulo 3 - Revisão Bibliográfica:** Neste capítulo é apresentada uma breve revisão da literatura sobre problemas relacionados;
- **Capítulo 4 - Modelo Matemático:** Neste capítulo é apresentado o modelo matemático proposto, as restrições do problema e testes computacionais;
- **Capítulo 5 - Metodologia:** Neste capítulo são descritos os algoritmos que serão utilizados para resolver o problema apresentado;
- **Capítulo 6 - Estudo de Caso:** Neste capítulo são apresentados os experimentos e os resultados obtidos;
- **Capítulo 7 - Conclusões:** Este capítulo conclui a pesquisa, fornecendo uma síntese das principais descobertas e conclusões, além de apresentar direções para pesquisas futuras.
- **Capítulo 8 - Trabalhos Futuros:** Este capítulo apresenta as perspectivas de trabalhos futuros.

## 2. Caracterização do problema

O problema de roteamento de comboios de combustível, aqui tratado, envolve um conjunto  $K$  de comboios de combustível,  $K = \{1, \dots, |K|\}$ , e um conjunto  $E$  de equipamentos de carga e de infraestrutura em atividades de mina,  $E = \{1, \dots, |E|\}$ , a serem abastecidos nos seus locais de operação no próximo turno de trabalho. Este problema tem as seguintes características:

### (1) Horizonte de Planejamento ( $H$ )

- (a) Existe um horizonte de planejamento do roteamento  $H$ ,  $H = \{1, \dots, |H|\}$ , em minutos, que corresponde a um turno de trabalho;

### (2) Comboios de combustível ( $K$ )

- (a) No início de cada turno todos os comboios,  $K$ , saem de um depósito  $v_0$  localizada em  $DL$  e retornam à esta base no final do turno para a troca de operador;
- (b) Cada comboio  $k \in K$  possui uma capacidade  $FLC_k$  de diesel a ser transportado;
- (c) Cada comboio  $k \in K$  possui uma quantidade de diesel  $FQ_k$  ( $FQ_k \leq FLC_k$ ) no início do turno para abastecimento de equipamentos de mina;
- (d) Cada comboio  $k \in K$  possui uma bomba de abastecimento com uma taxa de  $FFR_k$  litros por minuto (L/min);
- (e) Para cada comboio  $k \in K$  está alocado um motorista;
- (f) Existe um intervalo de 1 hora para refeição do motorista de cada comboio  $k \in K$  que deve iniciar no intervalo entre  $LTA_k$  e  $LTB_k$ ;
- (g) Durante o turno, quando a capacidade de carregamento,  $FLC_k$ , de cada comboio  $k \in K$ , atingir menos de 10%, o comboio deve se direcionar para reabastecimento em um posto de combustível  $p \in P$ ;

### (3) Equipamentos de carga e infraestrutura em atividades de mina ( $E$ )

- (a) O conjunto  $E$  é composto por Carregadeiras, Escavadeiras e Perfuratrizes que são abastecidos em campo;
- (b) Cada equipamento  $i \in E$  possui uma localização  $EL_i$ ;
- (c) Existe uma capacidade  $FSC_i$  de combustível do tanque de cada equipamento  $i \in E$ , em litros;
- (d) Cada equipamento  $i \in E$  tem um consumo de diesel  $FC_i$  em litros por hora;
- (e) Para cada equipamento  $i \in E$  existe uma estimativa da quantidade de combustível  $AF_{iv_0}$  presente no tanque, no início de cada turno;

- (f) Existe uma janela de tempo  $[a_i, b_i]$  para abastecimento de cada equipamento  $i \in E$ . O valor de  $a_i$  corresponde ao instante  $h$  em que o equipamento  $i$  está habilitado para abastecimento. Já o valor de  $b_i$  é dado pelo instante  $h$  em que o equipamento  $i$  irá atingir o limite crítico de combustível. Após este limite crítico, o equipamento pode ter uma pane seca.

O problema consiste em rotear os  $|K|$  comboios de combustível para realizar o abastecimento dos  $|E|$  equipamentos de mina no próximo turno com o objetivo de minimizar a maior rota. Portanto, busca-se gerar rotas balanceadas.

A seguir, para facilitar o entendimento, apresenta-se um exemplo simplificado do problema de roteamento de comboios. Neste exemplo tem-se cinco ativos para abastecimento em campo e dois caminhões tanque. Os tempos de abastecimento dos equipamentos em campo e a capacidade dos comboios foram desconsiderados, para efeito de simplificação.

Na Figura 2.1 apresenta-se a matriz de tempo de viagem, em minutos, dos cinco ativos para abastecimento em campo (pontos 1, 2, 3, 4 e 5) e da garagem de onde partem os comboios (ponto 0).

		DESTINOS					
		0	1	2	3	4	5
ORIGENS	0	0	38	56	18	49	51
	1	38	0	32	41	46	90
	2	56	32	0	66	77	102
	3	18	41	66	0	33	57
	4	49	46	77	33	0	88
	5	51	90	102	57	88	0

Figura 2.1: Matriz de tempo de viagem (minutos). Fonte: Autor.

A seguir, na Tabela 2.1, é apresentado uma solução factível para o roteamento dos comboios. O Comboio 01 sai da garagem em direção à localização do equipamento E3, realiza o seu abastecimento, segue em direção ao equipamento E4, realiza o seu abastecimento, e, por fim, segue em direção à garagem para finalizar a rota. Já o Comboio 02 abastece primeiramente o equipamento E1, se dirige ao equipamento E2, depois faz o abastecimento do equipamento E5 e, então, retorna à garagem.

Tabela 2.1: Exemplo de solução.

		Rotas				
Comboio 01	Garagem	E3	E4	Garagem		
Comboio 02	Garagem	E1	E2	E5	Garagem	

Para o planejamento realizado, observa-se que a rota do comboio 01 tem o custo de 100 minutos e a rota do comboio 02 tem o custo de 223 minutos.

### 3. Revisão bibliográfica

Na literatura são encontradas diversas aplicações do problema de roteamento de veículos com janelas de tempo (TOTH e VIGO, 2014). A seguir, apresentam-se alguns estudos recentes neste tema.

No trabalho de Pan *et al.* (2021a) é tratado o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo, no qual o tempo total da viagem varia conforme os diferentes níveis de congestionamento ao longo do dia. No artigo é notado que o horário de saída do veículo representa uma decisão importante para a redução do custo total da rota. Para resolvê-lo é proposto a utilização de um *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) (SHAW, 1998), que tem seus parâmetros de entrada ajustados automaticamente por uma ferramenta de configuração. No mesmo ano, os autores também trataram um problema de transporte urbano com múltiplas viagens com o objetivo de minimizar a distância total em Pan *et al.* (2021b). Para resolver o segundo problema é proposto um algoritmo baseado na meta-heurística *Variable Neighborhood Descent* (VND) (HANSEN *et al.*, 2010).

Um problema de roteamento de veículos elétricos com pontos de recarga de bateria é abordado em Keskin *et al.* (2021). Um algoritmo meta-heurístico baseado no ALNS é proposto para resolvê-lo. Um ALNS também é proposto em Chen *et al.* (2021) para resolver um problema de roteamento de furgões e robôs autônomos para entrega de encomendas. Em Zulvia *et al.* (2020) é abordado um problema de transporte de produtos perecíveis, como alimentos e medicamentos. Para solucioná-lo é proposto um algoritmo baseado no *Many-objective Gradient Evolution* (MOGE) buscando minimizar os custos operacionais, custos de deterioração e emissões de carbono, além de atender a satisfação dos clientes.

Em Utama *et al.* (2021) é proposto um algoritmo meta-heurístico *Artificial Bee Colony* (ABC) (MERNIK *et al.*, 2015) para resolver um problema de roteamento de veículos verdes com janelas de tempo. Neste problema os veículos não utilizam combustíveis fósseis e a função objetivo busca minimizar o custo total de consumo de combustível, além do atraso no tempo de entrega. Para o referido estudo foram considerados 30 clientes e um centro de distribuição, no qual os resultados foram comparados com o algoritmo de vizinho mais próximo. Um problema de roteamento verde com janelas de tempo também é tratado em Alinaghian *et al.* (2021). Neste problema busca-se minimizar o custo total das rotas, o consumo de combustível e o custo de veículos. As inclinações das estradas, velocidades e carga do veículo são consideradas neste estudo. Para a resolução do problema foi proposto um modelo de programação linear inteira mista e dois algoritmos meta-heurísticos, um baseado na Busca Tabu (GLOVER, 1986) e o outro baseado na Evolução Diferencial (STORN e PRICE, 1997). Ao final é realizada uma análise de sensibilidade para investigar a variabilidade da função objetivo.

Um algoritmo meta-heurístico híbrido é apresentado por Wu *et al.* (2021) para tratar o problema de roteamento de produtos estocáveis com janelas de tempo e consumo de combustível. No artigo é apresentada a otimização simultânea de rotas, depósitos e inventário para

os clientes e centros de distribuição. Para maior proximidade com casos reais é incorporado ao custo de transporte, o consumo de combustível dos veículos. A meta-heurística híbrida proposta para tratar o problema é baseada no algoritmo genético (GOLDBERG, 1989) e no algoritmo de gradiente descendente.

Em Alinaghian *et al.* (2021) é tratado um problema de roteamento verde de inventário (*Green Inventory*) com janelas de tempo. Neste problema busca-se minimizar o custo total das rotas, o consumo de combustível e o custo de veículos. As inclinações das estradas, velocidades e carga do veículo são consideradas neste estudo. Para a resolução do problema foi proposto um modelo de programação linear inteira mista e dois algoritmos meta-heurísticos, um baseado na Busca Tabu (GLOVER, 1986) e o outro baseado na Evolução Diferencial (STORN e PRICE, 1997). Ao final é realizada uma análise de sensibilidade para investigar a variabilidade da função objetivo.

Apesar do problema de roteamento de veículos com janelas de tempo ser amplamente tratado na literatura, não foi encontrado um estudo com as mesmas características do problema de roteamento de comboios de combustível para abastecimento de ativos de mina. Neste trabalho são propostos métodos exatos e heurísticos para resolvê-lo. Neste problema busca-se minimizar a maior rota, gerando assim, rotas balanceadas para os comboios. Esta proposta possui características inéditas, como o cálculo dinâmico da quantidade de combustível necessário para abastecer cada equipamento por instante de tempo, o tempo requerido para o abastecimento baseado na bomba utilizada e o controle de capacidade do comboio calculado também de maneira dinâmica. Para avaliar os métodos propostos foram utilizados dados reais do Complexo Carajás da Vale S.A, localizado em Carajás-PA.

## 4. Modelo matemático proposto

Neste capítulo é apresentada uma formulação linear inteira mista para resolver uma versão simplificada do problema de roteamentos de comboios de combustível no abastecimento de equipamentos de mina. A formulação matemática não trata o intervalo de almoço dos motoristas e o reabastecimento dos comboios em postos de combustíveis. O objetivo desta proposta é verificar se programação linear inteira mista é a técnica adequada para resolver instâncias reais do problema em estudo.

Algumas características do problema em estudo não foram encontradas na literatura, destacam-se as restrições que tratam do cálculo dinâmico da quantidade de combustível necessário para abastecer cada equipamento, do controle dinâmico da quantidade de combustível em cada comboio e do cálculo do tempo de abastecimento de acordo com a bomba utilizada pelo comboio.

### 4.1. Conjuntos, parâmetros e variáveis

Definimos e consideramos no modelo os seguintes conjuntos, parâmetros e variáveis:

- Conjuntos:

$\mathcal{K}$  : Comboios de combustível

$\mathcal{E}$  : Conjunto de equipamentos de carga e infraestrutura de mina para abastecimento

$\mathcal{V}$  :  $\mathcal{E} \cup \{v_0\}$ , onde  $v_0$  é o depósito de onde partem os comboios.

- Parâmetros de entrada:

$T_{kij}$  : Tempo de viagem de um comboio  $k \in \mathcal{K}$  para ir do vértice  $i$  para o vértice  $j$  (minutos);

$FLC_k$  : Capacidade de transporte de diesel para cada comboio  $k \in \mathcal{K}$  (litros);

$A_i$  : Início da janela de tempo de cada equipamento  $i \in \mathcal{E}$ ;

$B_i$  : Fim da janela de tempo de cada equipamento  $i \in \mathcal{E}$ ;

$A_{v_0}$  : Início da janela de tempo do horizonte de planejamento;

$B_{v_0}$  : Fim da janela de tempo do horizonte de planejamento;

$FSC_i$  : Capacidade do tanque de combustível do equipamento  $i \in \mathcal{E}$  (litros);

$AF_{iv_0}$  : Estimativa da quantidade de combustível existente no tanque do equipamento  $i \in \mathcal{E}$  no início do turno,  $v_0$  (litros);

$FC_i$  : Consumo de diesel para cada equipamento  $i \in \mathcal{E}$  (litros por hora);

$FFR_k$  : Taxa de abastecimento da bomba do comboio  $k \in \mathcal{K}$  (litros por minuto);

$M_i$  : Limite superior para a quantidade de combustível a ser abastecido no equipamento  $i \in \mathcal{E}$  (litros).

- Variáveis de decisão e auxiliares:

$$x_{kij} : \begin{cases} 1 & \text{Se o Comboio } k \in \mathcal{K} \text{ parte do} \\ & \text{vértice } i \in \mathcal{V} \text{ para o vértice } j \in \mathcal{V}; \\ 0 & \text{Caso contrário.} \end{cases}$$

$\gamma_i$  : Instante em que o vértice  $i \in \mathcal{V}$  é visitado;

$\beta_{v_0k}$  : Instante em que o veículo  $k \in \mathcal{K}$  completa a sua rota retornando ao depósito ( $v_0$ );

$s_{ik}$  : Tempo gasto pelo comboio  $k \in \mathcal{K}$  para abastecer o equipamento  $i \in \mathcal{E}$  (minutos);

$\delta_i$  : Quantidade de combustível a ser abastecido no equipamento  $i \in \mathcal{E}$  (litros);

$\alpha_{ik}$  : Caso o comboio  $k \in \mathcal{K}$  seja utilizado para o abastecimento do equipamento  $i \in \mathcal{E}$ ,  $\alpha_{ik}$  recebe a quantidade a ser abastecido, em litros. Caso contrário,  $\alpha_{ik}$  recebe 0;

$$y_{ik} : \begin{cases} 1 & \text{Se o Comboio } k \in \mathcal{K} \text{ abastece o} \\ & \text{equipamento } i \in \mathcal{E}; \\ 0 & \text{Caso contrário.} \end{cases}$$

$rmax$  : Custo da maior rota.

## 4.2. Formulação linear inteira mista

A função objetivo do problema é descrita em (4.1) e busca gerar rotas balanceadas por meio da minimização da maior rota.

$$\text{Min } rmax \tag{4.1}$$

A seguir, são apresentadas as restrições da formulação matemática.

$$\sum_{\substack{j \in \mathcal{V} \\ j \neq v_0}} x_{kv_0j} = 1, \quad \forall k \in \mathcal{K} \tag{4.2}$$

$$\sum_{\substack{j \in \mathcal{V} \\ i \neq j}} \sum_{k \in \mathcal{K}} x_{kij} = 1, \quad \forall i \in \mathcal{V} - [v_0] \tag{4.3}$$

$$\sum_{\substack{i \in \mathcal{V} \\ i \neq h}} x_{kih} - \sum_{\substack{j \in \mathcal{V} \\ j \neq h}} x_{khj} = 0, \quad \forall h \in \mathcal{V}, \forall k \in \mathcal{K} \tag{4.4}$$

O conjunto de restrições (4.2) garante que todos os comboios deixem o depósito uma única vez. A garantia que todos os equipamentos sejam visitados uma única vez é dada pelo conjunto de restrições (4.3). As restrições (4.4) asseguram o fluxo da rede.

$$\delta_i = FSC_i - AFiv_0 + \frac{FC_i}{60} \times \gamma_i, \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{V}} x_{kij} = y_{jk} \quad \forall j \in \mathcal{V} - [v_0], \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.6)$$

$$\delta_i - M_i(1 - y_{ik}) \leq \alpha_{ik}, \quad \forall i \in \mathcal{V} - [v_0], \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.7)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{V} - [v_0]} \alpha_{ik} \leq FLC_k, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.8)$$

$$\frac{\alpha_{ik}}{FFR_k} = s_{ik}, \quad \forall i \in \mathcal{V} - [v_0], \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.9)$$

Do conjunto de restrições (4.5) até o conjunto (4.9) são tratadas as restrições relacionadas ao abastecimento dos equipamentos de mina e à capacidade dos comboios, criadas especificamente para esta finalidade. Estas restrições são inéditas na literatura. Os conjuntos de restrições (4.5) e (4.6), respectivamente, calculam a quantidade de combustível a ser abastecido em cada equipamento e quais comboios devem abastecer cada equipamento. O conjunto de restrições (4.7) permitem que um equipamento seja abastecido apenas se houver combustível suficiente no comboio para abastecê-lo por completo. Nestas restrições o  $M_i$  faz o papel de *Big M*. As restrições (4.8) asseguram que a capacidade dos comboios seja respeitada. Por fim, o conjunto de restrições (4.9) calcula o tempo necessário para abastecimento de cada equipamento com cada comboio.

$$\gamma_{v_0} = 0 \quad (4.10)$$

$$\gamma_i + s_{ik} + T_{kij} - B_i(1 - x_{kij}) \leq \gamma_j, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \forall j \in \mathcal{V} - [v_0], \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.11)$$

$$\gamma_i + s_{ik} + T_{kiv_0} - B_i(1 - x_{kiv_0}) \leq \beta_{v_0k}, \quad \forall i \in \mathcal{V} - [v_0], \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.12)$$

$$rmax \geq \beta_{kv_0}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.13)$$

Os conjuntos de restrições (4.10), (4.11) e (4.12) tratam dos instantes em que os comboios visitam os vértices. A restrição (4.10) garante que os comboios partam do depósito no instante zero. As restrições (4.11) asseguram que o instante em que um equipamento é visitado por um comboio deve ser maior que o instante de chegada ao equipamento visitado anteriormente, somando ao seu tempo de abastecimento e de viagem até o equipamento atual. Nas restrições anteriores, o  $B_i$  faz o papel de *Big M*. As restrições (4.12) calculam o instante em que

cada comboio irá retornar ao depósito. Por fim, as restrições (4.13) calculam a maior rota.

$$0 \leq \beta_{v_0k} \leq B_{v_0}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.14)$$

$$x_{kij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \forall j \in \mathcal{V} \quad (4.15)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \forall i \in \mathcal{V} - [v_0] \quad (4.16)$$

$$s_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.17)$$

$$\alpha_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{V}, \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.18)$$

$$A_i \leq \gamma_i \leq B_i, \quad \forall i \in \mathcal{V} - [v_0], \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.19)$$

Por fim, o domínio das variáveis é definido nas restrições (4.14), (4.15), (4.16), (4.17), (4.18) e (4.19).

### 4.3. Validação do modelo matemático

Nesta seção é realizada a validação da formulação matemática proposta utilizando três instâncias de pequeno porte, baseado em dados reais do Complexo Carajás. A formulação foi implementada no resolvidor Gurobi, versão 6.5.1, por meio da linguagem de programação C#. Na execução da formulação foi utilizado um tempo limite (*TimeLimit*) de 2 horas. O computador utilizado nos experimentos computacionais foi um notebook Precision 7450, com processador Intel Xeon, 2.8 GHz, 64 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10 de 64 bits.

A organização desta seção é dada como segue. O cálculo do limite superior para a quantidade de combustível é dado na Subseção 4.3.1. Na Subseção 4.3.2 apresentam-se as instâncias, junto com seus dados de entrada. Já na Subseção 4.3.3 reportam-se os resultados obtidos.

#### 4.3.1. Cálculo do limite superior para a quantidade de combustível a ser abastecido (*Big M*)

No conjunto de restrições (4.7) é necessário um *Big M*, representado por  $M_i$ , para o limite superior da quantidade de combustível a ser abastecido em cada equipamento de mina  $i \in \mathcal{V} - [v_0]$ . Para calcular este limite é usada a Eq. (4.20).

$$M_i = FSC_i - AFiv_0 + \frac{FC_i}{60} \times B_i, \quad \forall i \in \mathcal{V} - [v_0] \quad (4.20)$$

O limite superior é dado pela diferença da capacidade do tanque do equipamento  $i$  ( $FSC_i$ ) e a sua quantidade combustível no início do turno ( $AF_{i,v_0}$ ). A seguir, esta diferença

é somada à taxa de consumo do equipamento ( $\frac{FC_i}{60}$ ) multiplicado pelo fim da janela de tempo ( $B_i$ ), que é o último instante em que o equipamento  $i$  pode ser abastecido.

### 4.3.2. Conjunto de instâncias avaliadas

Para avaliar o modelo matemático proposto foram analisadas três instâncias baseadas em dados reais do Complexo Carajás, coletadas entre agosto e outubro de 2021. Para estas instâncias é considerado um turno de trabalho de 9 horas.

Na Tabela 4.1 são apresentados os dados dos equipamentos em operação. O índice crítico descrito nesta tabela é utilizado para calcular o fim da janela de tempo. Já na Tabela 4.2 são reportados os dados das caminhões tanque disponíveis. Por fim, a matriz de tempo médio de viagens está disponível em Souza *et al.* (2022).

Tabela 4.1: Características dos equipamentos para abastecimento.

Equipamentos para abastecimento	Tipo de Equipamento	Consumo de diesel (l/h)	Capacidade do tanque (l)	Combustível no início do turno (l)	Índice crítico (%)	Início janela de tempo (min)	Fim janela de tempo (min)
CR 7707	Carregadeira	206	3.975	1867	20	0	312,23
CR 7708	Carregadeira	207	3.975	2599	20	0	522,90
CR 8102	Carregadeira	157	4.940	1939	20	0	362,70
CR 8103	Carregadeira	245	4.940	2048	20	0	259,89
CR 8104	Carregadeira	228	4.940	2692	20	0	449,07
CR 8105	Carregadeira	220	4.940	2004	20	0	277,66
CR 8106	Carregadeira	221	4.940	3750	20	0	540,00
CR 8108	Carregadeira	199	4.940	1618	20	0	190,14
CR 8109	Carregadeira	210	4.940	3774	20	0	540,00
CR 8111	Carregadeira	199	4.940	3501	20	0	540,00
CR 8113	Carregadeira	221	4.940	2669	20	0	455,76
CR 8114	Carregadeira	215	4.940	3897	20	0	540,00
CR 8115	Carregadeira	223	4.940	1493	20	0	136,17
ES 0602	Escavadeira	84	3.400	2477	20	0	540,00
ES 0603	Escavadeira	100	3.400	2762	20	0	540,00
PF 0505	Perfuratriz	26	370	186	30	0	175,00
PF 0602	Perfuratriz	120	2.000	1689	30	0	540,00
PF 0704	Perfuratriz	96	1.270	1144	30	0	478,00
PF 0706	Perfuratriz	94	1.270	635	30	0	161,00
PF 0707	Perfuratriz	98	1.270	999	30	0	364,00
PF 0708	Perfuratriz	85	1.270	842	30	0	324,00
PF 0709	Perfuratriz	85	1.270	776	30	0	279,00
PF 0710	Perfuratriz	89	1.270	689	30	0	208,00
PF 0803	Perfuratriz	92	1.370	1125	30	0	466,00
PF 0804	Perfuratriz	106	1.370	1342	30	0	522,00
PF 6702	Perfuratriz	98	1.270	744	30	0	222,00
PF 7113	Perfuratriz	97	1.270	972	30	0	328,00
PF 7301	Perfuratriz	98	1.270	912	30	0	325,00
PF 7302	Perfuratriz	91	1.270	908	30	0	347,00
PF 7304	Perfuratriz	94	1.270	1167	30	0	502,00
PF 7305	Perfuratriz	96	1.270	980	30	0	374,00

Baseado nestes dados, foram analisados três instâncias:

#### 1. Instância 1:

- Comboios: Apenas os 03 primeiros comboios estão disponíveis para utilização no turno;
- Equipamentos para abastecimento: Apenas os 10 primeiros equipamentos estão disponíveis para abastecimento no turno;

Tabela 4.2: Características dos comboios.

	Comboios				
	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5
Capacidade transportada (l)	30000	30000	30000	30000	20000
Taxa de abastecimento (l/min)	250	250	250	250	250
Velocidade média (km/h)	40	40	40	40	40

2. Instância 2:

- Comboios: Apenas os 03 primeiros comboios estão disponíveis para utilização no turno;
- Equipamentos para abastecimento: Apenas os 12 primeiros estão disponíveis para abastecimento no turno;

3. Instância 3:

- Comboios: Todos os comboios estão disponíveis para utilização no turno;
- Equipamentos para abastecimento: Todos os equipamentos estão disponíveis para abastecimento no turno.

### 4.3.3. Resultados

Nesta subsecção são apresentados os resultados para a formulação matemática. Na Tabela 4.3 são reportados o identificador da instância, o número de comboios, o número de equipamentos para abastecimento, o valor da função objetivo (custo da maior rota, conforme Eq.(4.1) da formulação matemática) e o tempo de execução do resolvidor em cada instância avaliada.

Tabela 4.3: Resultados encontrados pelo modelo matemático.

Instância	#Comboios	#Equip.	FO	Tempo (s)
01	3	10	151.79*	1.305
02	3	12	160,94	7.200
03	5	31	243,36	7.200

A solução com o asterisco indica que o resolvidor conseguiu comprovar que a solução encontrada na Instância 01 é ótima. Nas outras duas instâncias a otimalidade das soluções não foi comprovada.

A seguir, são apresentadas as rotas encontradas para cada instância nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6, respectivamente. A primeira coluna indica o comboio utilizado e a segunda coluna apresenta a rota do comboio, sendo 0 a garagem. Já a última coluna reporta o custo da rota, dado pelo somatório dos tempos de abastecimentos e dos tempos de viagem até retornar à garagem. Por

exemplo, na Instância 01, o Comboio 01 deve visitar para abastecimento os equipamentos 3, 6, 4 e 10, nesta ordem. Após isso, ele retorna para a garagem. Esta rota tem o custo de 151,79 minutos.

Tabela 4.4: Rotas para a Instância 01.

Comboio	Rota	Custo (min)
01	0-3-6-4-10-0	151,79
02	0-2-1-5-0	150,76
03	0-9-7-8-0	148,00

Tabela 4.5: Rotas para a Instância 02.

Comboio	Rota	Custo (min)
01	0-2-1-5-0	150,90
02	0-11-9-7-8-0	154,25
03	0-12-10-4-6-3-0	160,94

Tabela 4.6: Rotas para a Instância 03.

Comboio	Rota	Custo (min)
01	0-19-3-5-25-31-29-0	236,28
02	0-2-9-7-26-14-21-18-0	243,36
03	0-6-27-4-24-10-16-15-22-0	230,07
04	0-20-11-28-1-30-12-0	230,98
05	0-13-17-8-23-0	210,99

Pode-se verificar que em todos os resultados as rotas estão balanceadas pelos seus respectivos custos.

A seguir, são reportadas nas tabelas 4.7, 4.8 e 4.9, respectivamente, as informações dos abastecimentos planejados em cada instância.

Tabela 4.7: Informações dos abastecimentos a serem realizados na Instância 1.

Equipamentos para abastecimento	Instante de abastecimento (min)	Quantidade de diesel a ser abastecido (l)	Tempo de abastecimento (min)
CR 7707	58,89	2310,19	9,24
CR 7708	28,00	1472,60	5,89
CR 8102	24,00	3063,93	12,26
CR 8103	77,72	3209,00	12,84
CR 8104	108,16	2658,41	10,63
CR 8105	49,26	3116,23	12,46
CR 8106	78,49	1479,47	5,92
CR 8108	98,41	3648,06	14,59
CR 8109	59,00	1372,50	5,49
CR 8111	111,56	1808,81	7,24

Tabela 4.8: Informações dos abastecimentos a serem realizados na Instância 2.

Equipamentos para abastecimento	Instante de abastecimento (min)	Quantidade de diesel a ser abastecido (l)	Tempo de abastecimento (min)
CR 7707	58,89	2310,19	9,24
CR 7708	28,00	1472,60	5,89
CR 8102	123,63	3325,18	13,30
CR 8103	68,78	3172,52	12,69
CR 8104	117,16	2692,60	10,77
CR 8105	97,47	3292,65	13,17
CR 8106	91,07	1525,88	13,10
CR 8108	111,17	3690,37	14,76
CR 8109	71,41	1415,94	5,66
CR 8111	41,47	1576,48	6,32
CR 8113	43,68	2432,11	9,73
CR 8114	21,00	1118,32	4,47

Tabela 4.9: Informações dos abastecimentos a serem realizados na instância 3.

Equipamentos para abastecimento	Instante de abastecimento (min)	Quantidade de diesel a ser abastecido (l)	Tempo de abastecimento (min)
CR 7707	117,37	2510,98	10,04
CR 7708	28,00	1472,60	5,89
CR 8102	54,70	3144,43	12,58
CR 8103	73,73	3192,72	12,77
CR 8104	80,28	2552,62	10,21
CR 8105	29,00	3042,11	12,17
CR 8106	90,54	1523,93	6,10
CR 8108	145,98	3805,69	15,22
CR 8109	70,89	1414,11	5,66
CR 8111	118,10	1830,51	7,32
CR 8113	61,30	2497,11	9,99
CR 8114	202,90	1770,78	7,08
CR 8115	45,00	3613,88	14,46
ES 0602	143,56	1124,43	4,50
ES 0603	163,40	911,37	3,65
PF 0505	142,42	245,07	0,98
PF 0602	79,80	470,24	1,88
PF 0704	181,69	416,02	1,66
PF 0706	26,00	675,93	2,70
PF 0707	34,00	326,53	1,31
PF 0708	163,05	660,22	2,64
PF 0709	185,05	755,69	3,02
PF 0710	187,20	858,68	3,43
PF 0803	101,50	400,63	1,60
PF 0804	131,49	260,30	1,04
PF 6702	124,64	729,58	2,91
PF 7113	57,16	390,42	1,56
PF 7301	99,29	520,18	2,08
PF 7302	181,73	637,62	2,55
PF 7304	171,41	371,55	1,36
PF 7305	162,53	550,05	2,20

Observa-se nas tabelas que as restrições de janela de tempo e cálculo da quantidade de combustível para abastecimento foram respeitadas. Por exemplo, o equipamento CR 7707 foi abastecido no instante 58,89 minutos com 2310,19 litros de diesel nas instâncias 01 e 02. Já na instância 03, este equipamento foi abastecido mais tarde, no instante 117,37 minutos, e necessitou de 2510,98 litros de diesel para completar o seu tanque.

A partir dos resultados obtidos, concluí-se que para instâncias de pequeno porte, como as avaliadas nesta seção, a formulação matemática proposta pode ser utilizada para apoiar na tomada de decisão. Contudo, em instâncias reais na mina de Carajás existem um número maior de comboios disponíveis e um número maior de equipamentos de mina a serem abastecidos. Assim, um método baseado em meta-heurística faz-necessário para tratar o problema. Esta proposta é discutida no próximo capítulo.

## 5. Algoritmo meta-heurístico proposto

Neste capítulo é apresentado o algoritmo meta-heurístico proposto para resolver instâncias de grande porte do problema de roteamento de comboios de combustível, considerando todas as restrições do problema. O algoritmo proposto é baseado na meta-heurística *Iterated Local Search* (ILS) (LOURENÇO *et al.*, 2001).

### 5.1. Representação da solução

Devido ao número de características do problema em estudo, adota-se neste trabalho uma representação indireta para uma solução. Uma solução  $s$  é representada como um vetor de inteiros com  $|\mathcal{K}|$  posições, sendo  $|\mathcal{K}|$  o número de comboios. A cada posição do vetor está associada uma lista de viagens alocadas ao comboio  $k \in \mathcal{K}$ . Em cada viagem o comboio realiza o abastecimento de um equipamento de mina. Na Figura 2.1 está ilustrada a solução  $s$  com três comboios e sete equipamentos de mina a serem abastecidos.

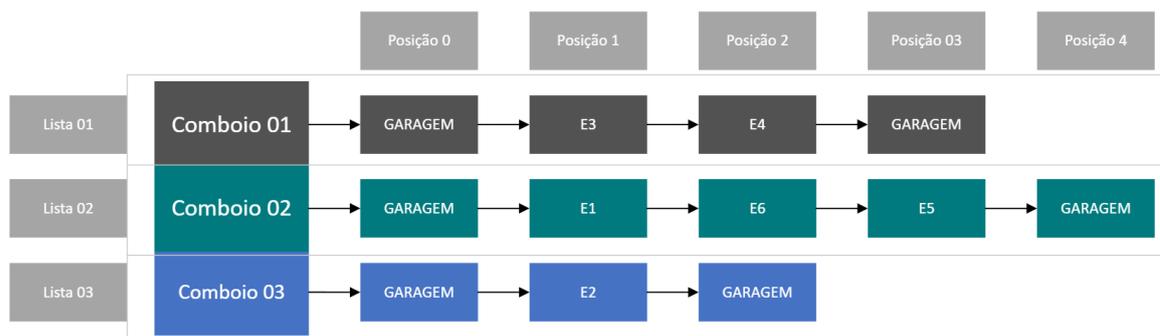


Figura 5.1: Representação de uma solução. Fonte: Autor.

Observa-se que todos os comboios iniciam a rota saindo da garagem. O Comboio 1 irá visitar os equipamentos E3 e E4, respectivamente, para abastecimento, após isso, ele irá retornar para a garagem. Já o Comboio 2 irá abastecer os equipamentos E1, E6 e E5, nesta ordem, e, também retornará para a garagem. Por fim, o Comboio 3 irá abastecer somente o equipamento E2 e, em seguida, retornará à garagem.

### 5.2. Algoritmo de posicionamento de viagens e avaliação da solução

Nesta seção, é apresentado o algoritmo de posicionamento de viagens, chamado TPA, da sigla em inglês *Travel position algorithm*. Este algoritmo tem o objetivo de calcular o custo de uma solução, considerando todas as restrições do problema, incluindo o intervalo de almoço dos motoristas e o reabastecimento dos comboios em postos de combustíveis, que não são tratadas

no modelo matemático descrito no capítulo anterior. O TPA é descrito no pseudocódigo do Algoritmo 1.

---

**Algorithm 1:** TPA - *Travel position algorithm*

---

**input** : Solução  $s$ , Penalidade  $w$ , Tempo de almoço  $ta$ , Tempo de reabastecimento de um comboio  $tr$

**output:** Custo

```

1  $Custo \leftarrow 0$ ;
2 for cada comboio  $k \in s$  do
3    $contCusto_k \leftarrow 0$ ;
4    $contCustoInfactibilidade_k \leftarrow 0$ ;
5    $jaAlmocou \leftarrow \text{falso}$ ;
6   for cada equipamento  $i$  a ser abastecido pelo comboio  $k$  do
7      $fimJanela_i \leftarrow \text{retornaFimJanelaTempo}(s, k_i)$ ;
8     if  $contCusto_k > fimJanela_i$  then
9        $contCustoInfactibilidade_k \leftarrow contCustoInfactibilidade_k +$ 
10       $(contCusto_k - fimJanela_i) \times w$ ;
11       $contCusto_k \leftarrow contCusto_k + contCustoInfactibilidade_k$ 
12    end
13     $\delta_i \leftarrow \text{calculaQtdeCombustivel}(s, k_i)$ ;          /* Conforme Eq. (4.5) */
14     $contCusto_k \leftarrow contCusto_k + \delta_i / FFR_k$ ;      /* Contabiliza tempo
15    abastecimento */
16     $janelaAlmoco \leftarrow \text{estaJanelaTempoAlmoco}(s, k, contCusto_k)$ ;
17    if  $jaAlmocou = \text{falso} \ \& \ janelaAlmoco = \text{verdadeiro}$  then
18       $jaAlmocou \leftarrow \text{verdadeiro}$ ;
19       $contCusto_k \leftarrow contCusto_k + ta$ ;
20    end
21     $reabastecerComboio \leftarrow \text{nivelCombustivel}(s, k, K_{i+1})$ 
22    if  $reabastecerComboio = \text{verdadeiro}$  then
23       $contCusto_k \leftarrow contCusto_k + tr$ ;
24    end
25    if  $Custo > contCusto_k$  then
26       $Custo \leftarrow contCusto_k$ ;
27    end
28 end
return:  $Custo$ ;

```

---

O Algoritmo recebe como parâmetros uma solução, a penalidade por violação da janela de tempo, o tempo necessário para o almoço de cada motorista e o tempo estimado para reabastecimento de cada comboio. Inicialmente, entra-se em um laço de repetição na linha 2,

percorrendo todos os comboios da solução  $s$ . A cada iteração, é calculado todos os custos de cada comboio  $k$  ( $contCusto_k$ ). Na linha 6 inicia-se um laço de repetição que percorre todas as viagens de um comboio. Na linha 8 é verificado se a janela de tempo do equipamento será respeitada. Caso contrário, atribui-se um custo por infeasibilidade na linha 11. Na linha 13 calcula-se a quantidade de combustível necessário para abastecer o equipamento. Já na linha 14 o tempo de abastecimento é contabilizado no custo do comboio. Na linha 15 verifica-se o comboio está na janela de tempo de almoço do motorista. Caso esteja na janela de almoço e o motorista ainda não tenha almoçado, contabiliza-se o tempo necessário para o almoço na linha 18. Na linha 20 verifica-se se o comboio precisa de reabastecimento em algum posto de combustível. Ele necessita de reabastecimento em duas situações: 1) o combustível não é suficiente para abastecer o próximo equipamento ( $k_{i+1}$ ); 2) o comboio esteja com menos de 10% da sua capacidade. Caso ele necessite de reabastecimento, o custo é contabilizado na linha 22. Na linha 24 é verificado se a rota atual é a maior rota. Ao final dos laços de repetição, retorna-se o custo da maior rota.

### **5.3. Algoritmo meta-heurístico**

Nesta seção é apresentado um algoritmo meta-heurístico baseado no ILS para o problema em estudo. O seu pseudocódigo é dado pelo Algoritmo 2.

---

**Algorithm 2:** Iterated Local Search (ILS)

---

**input** : Número máximo de iterações sem melhora  $iterMax$ , Número máximo de tentativas em um nível de perturbação  $tentativasMax$ , Penalidade  $w$ , Tempo de almoço  $ta$ , Tempo de reabastecimento de um comboio  $tr$

```
1  $s \leftarrow construtivo()$ ;  
2  $s \leftarrow buscaLocal(s)$ ;  
3  $s^* \leftarrow s$ ;  
4  $iterSemMelhora, tentativas \leftarrow 0$ ;  
5  $nivel \leftarrow 1$ ;  
6 while ( $iterSemMelhora \leq iterMax$ ) do  
7    $s' \leftarrow perturbacao(s, nivel)$ ;  
8    $s' \leftarrow buscaLocal(s')$ ;  
9   if  $TPA(s', w, ta, tr) < TPA(s^*, w, ta, tr)$  then  
10     $s^* \leftarrow s'$ ;  
11     $nivel \leftarrow 1$ ;  
12     $iterSemMelhora \leftarrow 0$ ;  
13  end  
14  else  
15     $iterSemMelhora \leftarrow iterSemMelhora + 1$ ;  
16    if  $tentativas \leq tentativasMax$  then  
17       $nivel \leftarrow nivel + 1$ ;  
18       $tentativas \leftarrow 1$ ;  
19    end  
20    else  
21       $tentativas \leftarrow 1$ ;  
22    end  
23  end  
24 end  
return:  $s^*$ 
```

---

O ILS recebe como parâmetros o número máximo de iterações sem melhora, o nível máximo de perturbação, número máximo de tentativas em um nível de perturbação e os parâmetros do JPA. Inicialmente, uma solução é construída na linha 1. Na linha 2, é aplicada uma busca local na solução construída. A seguir, variáveis locais são inicializadas. Na linha 6, entra-se em um laço de repetição até que o critério de parada seja atingido,  $iterMax$  iterações sem melhora na solução corrente. Na linha 7, gera-se uma solução corrente  $s'$  pela aplicação de uma perturbação na solução  $s$ . Em seguida, na linha 8, aplica-se busca local na solução corrente. Caso a solução corrente supere a melhor solução, a solução corrente é, então, armazenada. Caso contrário, as iterações sem melhora são incrementadas. Entre as linhas 16 e 22, controla-se o número máximo de tentativas no nível de perturbação. Ao final, é retornada a melhor solução

encontrada pelo ILS.

A seguir, nas próximas seções, são apresentados os componentes do ILS: 1) algoritmo construtivo; 2) busca local; 3) perturbação.

## 5.4. Algoritmo construtivo

O Algoritmo 3 descreve o algoritmo construtivo guloso desenvolvido para construir uma solução inicial do problema. Basicamente, o procedimento guloso seleciona, a cada etapa, a alternativa mais vantajosa disponível, utilizando como função gulosa o menor custo de inserção. Este procedimento é chamado guloso uma vez que busca sempre maximizar o benefício imediato de cada escolha, sem considerar o impacto na solução global.

---

### Algorithm 3: Construtivo

---

**input** : Lista de equipamentos a serem abastecidos  $\mathcal{E}$ , Lista de comboios disponíveis  $\mathcal{H}$ , Penalidade  $w$ , Tempo de almoço  $ta$ , Tempo de reabastecimento de um comboio  $tr$

**output**: Solução  $s$

```

1  $s \leftarrow \emptyset$ ;
2  $LC \leftarrow \mathcal{E}$ ;
3 while  $|LC| > 0$  do
4    $s^* \leftarrow s$ ;
5    $j^* \leftarrow 0$ ;
6    $menorCusto \leftarrow \infty$ ;
7   for cada comboio  $i \in \mathcal{H}$  do
8     for cada  $j \in LC$  do
9        $s'_i \leftarrow s_i \cup \{j\}$ ; /* Insere  $j$  na última posição do comboio  $i$  */
10      if  $menorCusto > TPA(s', w, ta, tr)$  then
11         $menorCusto \leftarrow TPA(s', w, ta, tr)$ ;
12         $s^* \leftarrow s'_i$ ;
13         $j^* \leftarrow j$ ;
14      end
15    end
16  end
17   $s \leftarrow s^*$ ;
18   $LC \leftarrow LC \setminus \{j^*\}$ ;
19 end

return:  $Custo$ ;

```

---

O algoritmo recebe como parâmetros o conjunto de comboios de combustível, um conjunto de equipamentos a serem abastecidos e, por fim, os parâmetros requeridos pelos JPA. Inicialmente, a solução a ser construída,  $s$ , é inicializada. Na linha 2, a lista de candidatos,

$LC$ , é composta pelos equipamentos a serem abastecidos. Enquanto a lista não estiver vazia, a cada iteração, percorre-se os comboios e os candidatos de  $LC$ . Para cada par de comboio  $i$  e equipamento candidato  $j$ , é gerada uma solução corrente  $s'$ . Nesta solução, o equipamento  $j$  é inserido na última posição do comboio  $i$  na solução  $s$ . A seguir, é verificado se esta inserção gera o menor custo. Em caso afirmativo, a solução é armazenada em  $s^*$ . Após analisar todas as combinações, na linha 17, a melhor combinação é inserida na solução parcial  $s$  e o equipamento respectivo é removido de  $LC$ . Ao final do algoritmo, uma solução completa  $s$  é retornada.

## 5.5. Algoritmo de busca local

Para explorar o espaço de soluções do problema é utilizado uma estrutura de vizinhança  $N^1$  baseada no movimento de múltipla inserção. Dada uma solução  $s$ , essa estrutura consiste em realocar o reabastecimento de um equipamento no vértice  $i$  para um outro vértice  $j$  do mesmo comboio ou para o vértice  $j$  de outro comboio.

A busca local utiliza a estratégia *First Improvement*. Nesta estratégia quando uma melhor solução vizinha é encontrada, a busca é interrompida e a solução vizinha é retornada. Somente no pior caso, todos os vizinhos serão visitados.

## 5.6. Algoritmo de perturbação

Nesta seção é descrito o procedimento de perturbação do ILS. Este procedimento é responsável por escapar de ótimos locais durante a busca. O seu pseudocódigo é descrito pelo Algoritmo 4.

---

### Algorithm 4: Algoritmo de perturbação

---

**input** : Solução  $s$ , Nível de perturbação  $nivel$   
**output**: Solução  $s$

- 1 **while**  $nivel > 0$  **do**
- 2      $nivel \leftarrow nivel - 1$ ;
- 3      $i_1^* \leftarrow$  Selecione aleatoriamente um comboio de  $s$ ;
- 4      $i_2^* \leftarrow$  Selecione aleatoriamente um comboio de  $s$ ;
- 5     Remova aleatoriamente de  $s$  um equipamento  $j_1^*$  do comboio  $i_1^*$ ;
- 6      $p \leftarrow$  Selecione aleatoriamente uma posição do comboio  $i_2^*$ ;
- 7     Insira o equipamento  $j_1^*$  na posição  $p$  do comboio  $i_2^*$  da solução  $s$ ;
- 8 **end**

**return**:  $s$ ;

---

No algoritmo de perturbação, a cada nível, seleciona-se dois comboios aleatoriamente, linhas 3 e 4. Do primeiro comboio, na linha 5, remove-se um equipamento alocado. Do segundo comboio, na linha 6, seleciona-se uma posição aleatória. Na linha 7, o movimento de

perturbação consiste em realocar o equipamento removido do primeiro comboio na posição aleatória que foi seleccionada no segundo comboio.

## 6. Estudo de caso

Neste capítulo é realizada a validação do algoritmo meta-heurístico proposto baseado no ILS. Um estudo de caso real do Complexo Carajás foi utilizado para validá-lo. O algoritmo foi implementado por meio da linguagem de programação Java, usando a IDE NetBeans 14.0. O computador utilizado nos experimentos foi o mesmo reportado na Seção 4.3. Por meio de testes empíricos os parâmetros do ILS foram calibrando,  $iterMax = 300$ ,  $tentativasMax = 30$  e  $w = 3$ . O tempo de almoço ( $ta$ ) e o tempo médio de reabastecimento ( $tr$ ) na mina é de 60 minutos.

### 6.1. Instância utilizada

No estudo de caso tem-se 61 equipamentos de mina a serem abastecido e 8 comboios disponíveis. Estes dados foram coletados no dia 02 de maio de 2023.

Na Tabela 6.1 são apresentados os dados dos equipamentos em operação da mina de Carajás a serem abastecido. Estes dados foram coletados nos sistemas de despacho e telemetria. O índice crítico é utilizado para calcular o fim da janela de tempo, que o limite máximo para abastecimento.

A Tabela 6.3 apresenta os comboios disponíveis e suas características para operação no próximo turno. Por fim, a matriz de tempo médio de viagens está disponível em Souza *et al.* (2022).

### 6.2. Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelo ILS. Ele foi executado 30 vezes para a instância descrita na seção anterior. O valor médio da função objetivo foi igual a 146,56 e o melhor valor de função objetivo foi igual a 145,46 minutos. Observa-se que o algoritmo proposto teve uma variabilidade baixa, menor que 1%.

O tempo médio para encontrar a solução foi menos de 1 segundo, o que habilita o seu uso para apoiar na tomada de decisão no planejamento do turno de trabalho.

A seguir, na Tabela 6.3, reporta-se as rotas planejadas para os comboios na melhor solução encontrada pelo ILS. Por exemplo, na rota do comboio CB6B13 são realizados o abastecimento de dez equipamentos de mina.

Na Figura 6.1, é fornecido um detalhamento da rota planejada para o comboio CB6B13. A jornada tem início na garagem central, de onde os comboios partem para cumprir suas tarefas. A primeira parada ocorre na mina de Morro-01, onde a perfuratriz PF 6704 será abastecida. Após o abastecimento, o comboio deve seguir em direção à mina de N4E, para abastecer a carregadeira CR 8106. Em seguida, deve-se deslocar para abastecer a pá carregadeira PC 2315, que também está operando na mina de N4E. Na sequência o comboio deve-se deslocar para a

Tabela 6.1: Características dos equipamentos para abastecimento.

Equipamentos para abastecimento	Tipo de Equipamento	Consumo de diesel (l/h)	Capacidade do tanque (l)	Combustível no início do turno (l)	Índice crítico (%)	Início janela de tempo (min)	Fim janela de tempo (min)
PF 0505	Perfuratriz	31	370	162	30	0	621
PF 0601	Perfuratriz	91	2.000	760	30	0	615
PF 0602	Perfuratriz	118	2.000	1943	30	0	39
PF 0704	Perfuratriz	92	1.270	713	30	0	503
PF 0705	Perfuratriz	89	1.270	1023	30	0	287
PF 0706	Perfuratriz	86	1.270	1234	30	0	127
PF 6704	Perfuratriz	90	1.080	1078	30	0	220
CR 6705	Perfuratriz	92	1.080	566	30	0	562
PF 7308	Perfuratriz	53	1.080	471	30	0	554
CR 7707	Carregadeira	180	1.080	477	30	0	669
CR 8102	Carregadeira	243	3.975	2877	20	0	206
CR 8103	Carregadeira	246	3.975	2096	20	0	403
CR 8106	Carregadeira	227	3.975	2677	20	0	224
CR 8108	Carregadeira	229	3.975	1746	20	0	470
CR 8109	Carregadeira	220	3.975	1867	20	0	436
CR 8111	Carregadeira	200	3.975	2139	20	0	317
CR 8112	Carregadeira	213	3.975	3814	20	0	852
CR 8113	Carregadeira	188	3.975	836	20	0	707
CR 8114	Carregadeira	228	3.975	1232	20	0	605
PC 2315	Pá Carregadeira	10	479	374	20	0	1.592
PC 2628	Pá Carregadeira	24	712	493	20	0	891
PC 2628	Pá Carregadeira	22	712	232	20	0	472
PC 2637	Pá Carregadeira	19	712	272	20	0	309
PC 2640	Pá Carregadeira	23	712	500	20	0	951
PC 2641	Pá Carregadeira	22	712	413	20	0	852
PC 2642	Pá Carregadeira	21	712	304	20	0	268
PT 3116	Patrol	32	1.326	1022	20	0	1.390
PT 3117	Patrol	35	1.326	1267	20	0	1.685
PT 3118	Patrol	29	1.326	355	20	0	588
PT 3119	Patrol	30	1.326	714	20	0	839
PT 3120	Patrol	32	1.326	800	20	0	945
PT 3121	Patrol	32	1.326	342	20	0	622
PT 3124	Patrol	30	1.326	656	20	0	720
RB 7906	Rebocador	58	3.900	2654	20	0	1.927
TE 2927	Trator de Esteira	68	1.609	1352	35	0	25
TE 2930	Trator de Esteira	57	1.609	1226	35	0	27
TE 2931	Trator de Esteira	54	1.609	1472	35	0	1.009
TE 2933	Trator de Esteira	59	1.609	1472	35	0	929
TE 2936	Trator de Esteira	75	1.609	981	35	0	387
TE 2937	Trator de Esteira	56	1.609	1199	35	0	39
TE 2938	Trator de Esteira	62	1.609	651	35	0	635
TE 2941	Trator de Esteira	70	1.609	1160	35	0	207
TE 2942	Trator de Esteira	65	1.609	1082	35	0	243
TE 2948	Trator de Esteira	55	1.609	605	35	0	675
TE 2952	Trator de Esteira	66	1.609	1451	35	0	812
TE 2954	Trator de Esteira	54	1.609	943	35	0	300
TE 2955	Trator de Esteira	57	1.609	981	35	0	278
TE 2956	Trator de Esteira	53	1.609	582	35	0	699
TE 2957	Trator de Esteira	55	1.609	1250	35	0	754
TE 2959	Trator de Esteira	63	1.609	969	35	0	333
TE 2960	Trator de Esteira	80	1.609	650	35	0	655
TE 2962	Trator de Esteira	63	1.609	1429	35	0	827
TE 2963	Trator de Esteira	50	1.609	1029	35	0	157
TE 2964	Trator de Esteira	60	1.609	706	35	0	578
TE 3215	Trator de Esteira	25	889	755	35	0	1.047
TE 3216	Trator de Esteira	27	889	390	35	0	545
TE 3217	Trator de Esteira	24	889	529	35	0	184
TE 3219	Trator de Esteira	32	889	444	35	0	472
TE 3623	Trator de Esteira	11	300	172	35	0	339
TE 3326	Trator de Esteira	46	1.000	644	35	0	338
TE 3329	Trator de Esteira	34	1.000	351	35	0	718

mina de N4WS, onde irá abastecer a pá carregadeira PC 2642 e a patrol PT 3119, respectivamente. Após este abastecimento, o comboio deve-se deslocar novamente para a mina de N4E

Tabela 6.2: Características dos comboios.

	Comboios							
	CB 9961	CB 9965	CB 9981	CB 9987	CB 9988	CB 9989	CB6B13	CB6B16
Capacidade transportada (l)	30000	30000	30000	20000	30000	30000	20000	20000
Taxa de abastecimento (l/min)	250	250	250	250	250	250	250	250
Velocidade média (km/h)	20	20	20	20	20	20	20	20

Tabela 6.3: Resultados do algoritmo proposto para o estudo de caso.

#Viagem	Comboios							
	CB9961	CB9965	CB9981	CB9987	CB9988	CB9989	CB6B13	CB6B16
0	Garagem	Garagem	Garagem	Garagem	Garagem	Garagem	Garagem	Garagem
1	CR 8108	PF 0601	PF 0602	PF 0704	PF 0705	PF 0706	PF 6704	PF 6705
2	PC 2637	CR 8113	CR 8111	CR 8102	PF 7707	CR 8103	CR 8106	CR 8109
3	PT 3116	PC 2641	PC 2628	CR 8114	CR 8112	PC 2622	PC 2315	PC 2640
4	PF 7308	RB 7906	PT 3117	TE 2937	TE 3217	PT 3118	PC 2642	PT 3120
5	PF 0505	TE 2942	TE 2927	Garagem	PT 3124	PT 3121	PT 3119	TE 2931
6	TE 2930	TE 2955	Garagem		TE 2936	TE 2941	TE 2933	TE 2938
7	Garagem	TE 2964			TE 2948	TE 2954	TE 2952	TE 2956
8		TE 3623			TE 2960	TE 2959	TE 2957	TE 2962
9		Garagem			TE 2963	TE 3215	TE 3216	TE 3326
10					Garagem	TE 3219	TE 3329	Garagem
11						Garagem	Garagem	
Custo	78,85	142,40	73,83	80,91	144,64	137,01	136,97	<b>145,46</b>

e realizar o abastecimento dos tratores de esteira TE 2933, TE 2952, TE 2957, TE 3216 e TE 3329, nesta ordem. Finalmente, o comboio retorna à garagem central, identificada como ponto P0, encerrando seu ciclo de trabalho. Esse ponto é o local onde o comboio é estacionado e preparado para o próximo turno de trabalho. .



Figura 6.1: Rota gerada para o comboio CB6B13 na mina de Carajás.

Fonte: Rotas desenvolvidas sobre imagens do Google Earth.

## 7. Conclusões

Este estudo tratou o problema de roteamento de comboios de combustível no abastecimento de equipamentos do Complexo Carajás da Vale S.A. O Complexo Carajás é uma das maiores operações de mineração de minério de ferro do mundo, com extensas áreas geográficas e uma ampla variedade de ativos de grande porte em operação diária. O abastecimento eficiente desses ativos é crucial para manter a produtividade e maximizar os recursos disponíveis. No entanto, a estratégia atual de roteamento de comboios é baseada em métodos manuais e tentativa e erro, o que conduz a ineficiências operacionais, atrasos e aumento dos custos. Portanto, a otimização deste roteamento é de extrema importância para melhorar a eficiência, reduzir os custos operacionais e aumentar a produtividade, contribuindo também para o desenvolvimento de soluções mais inteligentes e eficazes para a indústria de mineração.

O problema de roteamento de comboios possui características inéditas, ainda não exploradas na literatura. Por exemplo, o tempo de abastecimento, o cálculo do fim da janela de tempo baseado na estimativa de combustível de cada equipamento de mina e no consumo de cada um deles, o reabastecimento dos comboios e as janelas de tempo de almoço dos motoristas dos comboios.

Inicialmente, foi realizada a caracterização do problema, considerando todos os detalhes do problema, como o horizonte de planejamento no turno de trabalho, os comboios de combustível utilizados e os equipamentos em operação na mina a serem abastecidos. A seguir, foi proposta uma formulação de programação linear inteira para abordar uma versão simplificada do problema, que não considera os horários de almoço e os tempos de reabastecimento dos comboios. O objetivo principal dessa abordagem foi avaliar se este método é adequado para a solução do problema em questão. Nos experimentos computacionais a formulação proposta foi testada e demonstrou eficiência somente para instâncias pequenas, demandando muito tempo computacional. Para instâncias grandes, como as existentes no Complexo Carajás, o tempo computacional exigido pela formulação matemática inviabiliza o seu uso para apoiar na tomada de decisão.

Para tratar instâncias grandes foi proposto um algoritmo meta-heurístico baseado no *Iterated Local Search*. Devido à complexidade do problema, foi desenvolvido um novo algoritmo de alocação e posicionamento das viagens, chamado TPA, que considera todas as restrições do problema em estudo e faz o cálculo da função objetivo. A solução inicial do ILS é gerada por um algoritmo construtivo guloso. A busca local é baseada em um movimento de múltipla inserção e a perturbação realiza um movimento aleatório entre dois comboios.

Para validar o algoritmo meta-heurístico proposto foi analisado um estudo de caso real do Complexo Carajás. Os dados para o estudo de caso foram coletados em maio de 2023, fornecendo informações atualizadas e relevantes. O algoritmo proposto conseguiu encontrar uma boa solução de maneira instantânea para o estudo de caso com 61 equipamento de mina a serem abastecidos por 8 comboios de combustível. Todas as restrições do problema foram

consideradas, como horário de almoço dos motoristas e reabastecimento dos comboios durante o turno de trabalho. Com base nos resultados obtidos, o algoritmo meta-heurístico proposto se apresenta como uma ferramenta valiosa para apoiar na tomada de decisão.

## **8. Trabalhos futuros**

Como trabalhos futuros sugere-se explorar os itens abaixo:

1. Explorar as incertezas presentes na estimativa de consumo de combustível dos equipamentos de mina e nos tempos de viagem;
2. Analisar outras funções objetivo para o problema;
3. Expandir o estudo para outras frotas de caminhões na mineração, como comboios de lubrificação e caminhões pipa.

# Referências Bibliográficas

- ALINAGHIAN, M., TIRKOLAEI, E. B., DEZAKI, Z. K., et al.. “An augmented Tabu search algorithm for the green inventory-routing problem with time windows”, *Swarm and Evolutionary Computation*, v. 60, pp. 100802, 2021. ISSN: 2210-6502.
- CHEN, C., DEMIR, E., HUANG, Y. “An adaptive large neighborhood search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and delivery robots”, *European Journal of Operational Research*, v. 294, n. 3, pp. 1164–1180, 2021. ISSN: 0377-2217.
- GLOVER, F. “Future paths for integer programming and links to artificial intelligence”, *Computers Operations Research*, v. 13, n. 5, pp. 533–549, 1986. ISSN: 0305-0548. Applications of Integer Programming.
- GOLDBERG, D. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston, MA, USA, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. ISBN: 0201157675.
- HANSEN, P., MLADENOVIĆ, N., MORENO PEREZ, J. A. “Variable neighbourhood search: methods and applications”, *Annals of Operations Research*, v. 175, n. 1, pp. 367–407, 2010.
- KESKIN, M., ÇATAY, B., LAPORTE, G. “A simulation-based heuristic for the electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations”, *Computers Operations Research*, v. 125, pp. 105060, 2021. ISSN: 0305-0548.
- LOURENÇO, H., MARTIN, O., STÜTZLE, T. “A beginner’s introduction to Iterated Local Search”, pp. 1–11, 06 2001.
- MERNIK, M., LIU, S.-H., KARABOGA, D., et al.. “On clarifying misconceptions when comparing variants of the Artificial Bee Colony Algorithm by offering a new implementation”, *Information Sciences*, v. 291, pp. 115–127, 01 2015.
- PAN, B., ZHANG, Z., LIM, A. “A hybrid algorithm for time-dependent vehicle routing problem with time windows”, *Computers Operations Research*, v. 128, pp. 105193, 2021a. ISSN: 0305-0548.

- PAN, B., ZHANG, Z., LIM, A. “Multi-trip time-dependent vehicle routing problem with time windows”, *European Journal of Operational Research*, v. 291, n. 1, pp. 218–231, 2021b. ISSN: 0377-2217.
- SHAW, P. “Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems”. Em: *International conference on principles and practice of constraint programming*, pp. 417–431. Springer, 1998.
- SOUZA, R. P., COUTINHO, N. S., COTA, L. P. “Matriz dos tempos de viagens entre a garagem e os equipamentos”. 2022. Available in <https://github.com/lucianopkota/vrp-of-fuel-trucks>. Accessed on May 1, 2022.
- STORN, R., PRICE, K. “Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces”, *Journal of Global Optimization*, v. 11, pp. 341–359, 01 1997.
- TOTH, P., VIGO, D. *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. SIAM, 2014.
- UTAMA, D. M., FITRIA, T. A., GARSIDE, A. K. “Artificial Bee Colony Algorithm for Solving Green Vehicle Routing Problems with Time Windows”, *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1933, n. 1, pp. 012043, jun 2021.
- VALE. “Vale no Pará”. 2022. Available at url = <http://www.vale.com/hotsite/PT/Paginas/vale-conhecer/Vale-visitas/para/Home.aspx>, accessed on January 24, 2022.
- WU, W., ZHOU, W., LIN, Y., et al.. “A hybrid metaheuristic algorithm for location inventory routing problem with time windows and fuel consumption”, *Expert Systems with Applications*, v. 166, pp. 114034, 2021. ISSN: 0957-4174.
- ZULVIA, F. E., KUO, R., NUGROHO, D. Y. “A many-objective gradient evolution algorithm for solving a green vehicle routing problem with time windows and time dependency for perishable products”, *Journal of Cleaner Production*, v. 242, pp. 118428, 2020. ISSN: 0959-6526.