

FLÁVIO LUIZ DA MATA

CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE COMBOIOS DE COMBUSTÍVEL NO COMPLEXO DE CARAJÁS

FLÁVIO LUIZ DA MATA

CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE COMBOIOS DE COMBUSTÍVEL NO COMPLEXO DE CARAJÁS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista em Automação de Processos de Mineração.

Área de concentração: Otimização de Rotas

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

Título: Caracterização do problema de roteamento de comboio de combustível no Complexo de Carajás Vale

Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (X) Pública

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M375c

Mata, Flávio Luiz da

Caracterização do problema de roteamento de comboio de combustível no Complexo de Carajás - Vale. Flávio Luiz da Mata... [et al.] - Ouro Preto, MG: ITV, 2022.

27 p.: il.

Monografia (Especialização latu sensu) - Instituto Tecnológico Vale, 2022. Orientador: Luciano Perdigão Cota

1. Roteamento de Veículos. 2. Comboios de Combustível. 3. Otimização Combinatória. I. Cota, Luciano Perdigão. II. Título.

CDD.23. ed. 629.892

Flávio Luiz da Mata

CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE COMBOIOS DE COMBUSTÍVEL NO COMPLEXO DE CARAJÁS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Automação para Processos de Mineração].

Orientador: Prof. D.Sc. Luciano Perdigão Cota

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 15 de dezembro de 2022 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. D.Sc. Luciano Perdigão Cota
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Prof. MSc. Natanael Salgado Coutinho
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Prof.ª D.Sc. Tatianna Aparecida Pereira Beneteli
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 ("MP nº 2.200-2").

documento foi assinado eletronicamente por Luciano Perdigão Cota, Natanael Salgado Coutinho e Tatianna Aparecida Pereira Beneteli.

v verificar as assinaturas vá ao site https://vale.portaldeassinaturas.com.br.443 e utilize o código 34FC-FOEE-4A25-E11E. This document has been digitally signed by {signers/Nane.portaldeassinaturas.com.br.443 and use the tronically signed by Luciano Perdigão Cota, Natanael Salgado Coutinho e Tatianna Aparecida Pereira Beneteli. To verify the signatures, go to the site https://vale.portaldeassinaturas.com.br.443 and use the 34FC-FOEE-4A25-E11E.



PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/34FC-F0EE-4A25-E11E ou vá até o site https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443 e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale. To check the signatures click on the link: https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/34FC-F0EE-4A25-E11E or go to the Websitehttps://vale.portaldeassinaturas.com.br:443 and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: 34FC-F0EE-4A25-E11E



Hash do Documento

02F7B43B902CD3B38832E69BD70DBBF2D5888681D626E52B4AA53B042D497FA2

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 04/01/2023 é(são) :

☑ Luciano Perdigão Cota (Signatário) - 067.976.936-67 em 04/01/2023 10:10 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: luciano.p.cota@itv.org

Evidências

Client Timestamp Wed Jan 04 2023 10:10:32 GMT-0300 (-03)

Geolocation Latitude: -20.414704573359725 Longitude: -42.91941055100683 Accuracy:

6.270643173478116 IP 177.51.39.119 Hash Evidências:

6D3D972CE8F32ECC9A4A661988B3A13A6AD9583C52DAB5DCCFE9F1BDA740900A

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: Natanael.Coutinho@pq.itv.org

Evidências

Client Timestamp Wed Jan 04 2023 09:50:28 GMT-0300 (Hora padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -23.0100289 Longitude: -45.5406544 Accuracy: 15.229

IP 179.235.91.162 Hash Evidências:

1BE8853DCDF2C0CD7B34677539FCEC4651EAF0657303EACF0DF19A630A698A59

☑ Tatianna Aparecida Pereira (Signatário) - em 02/01/2023 14:07 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: tatianna.beneteli@pq.itv.org

Evidências

Client Timestamp Mon Jan 02 2023 14:07:51 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília) **Geolocation** Latitude: -21.7725977 Longitude: -43.3094905 Accuracy: 16.06999969482422 **IP** 186.235.101.240

Hash Evidências:

39C450CE9D926EEF982728D71B99C4BD1EAFFE75116BDBC6FC9D3E91C16B58E4



Dedico este trabalho em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada e a todos que fazem parte da minha vida e em especial a minha esposa Cibele, meus filhos Miguel e Nathan, pelo carinho, força, coragem e apoio.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me suportar, iluminar e me dar força durante esta caminhada.

Agradeço também a minha esposa Cibele e aos meus filhos, que de forma especial e carinhosa me apoiou nos momentos de dificuldades.

E não deixando de agradecer de forma grandiosa aos meus pais, a quem eu rogo todas as noites pela minha existência.

Aos meus irmãos, cunhados e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegar até esta etapa de minha vida.

Ao professor Luciano Cota pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica.

Aos meus amigos e colegas de curso pela ajuda e amizade.

A todos que participaram, direta ou indiretamente, do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

Aos meus gestores Vale, por proporcionar a participação neste programa de Especialização junto ao Instituto Tecnológico Vale.

Por fim, agradeço ao Instituto Tecnológico Vale e a todos os professores, que tiveram a capacidade de transmitir o conhecimento necessário para aprendizado teórico e prático.

"Espere no Senhor. Seja forte! Coragem! Espere no Senhor." Salmos 27:14.

RESUMO

Este trabalho aborda o problema de roteamento de comboios de combustível no complexo minerário de Carajás, da Vale S.A. Os equipamentos semimóveis, compostos por carregadeiras, tratores e perfuratrizes, apresentam dificuldades de locomoção até o posto de abastecimento devido a extensa localização geográfica das frentes de lavra. Por isso, eles são abastecidos nos locais de operação por meio de caminhões de combustível, chamados de comboios, que possuem toda a infraestrutura necessária para abastecimento em campo. Atualmente a determinação das rotas dos comboios é realizada de forma empírica, utilizando a estratégia tentativa e erro. Esta estratégia pode ocasionar aumento significativo nas distâncias percorridas pelos comboios, elevando o tempo de espera por atendimento e, em casos mais extremos, a ocorrência de interrupção do funcionamento dos equipamentos de mina por falta de combustível, impactando diretamente na produção. O objetivo deste trabalho é caracterizar o problema de roteamento de comboios de combustível para que novos estudos possam abordar métodos de solução para o problema.

Palavras-chave: Roteamento de veículos. Comboios de combustível. Otimização combinatória.

Fase da Cadeia: Mina.

ABSTRACT

This work deals with the problem of routing fuel truck in the mining complex of Carajás, owned by Vale S.A. The semi-mobile equipment, consisting of whell loaders, tractors, rotary drills, has difficulties in getting to the fueling station due to the extensive geographical location of the mining fronts. Therefore, they are supplied at the operating sites by fuel trucks, called convoys, which have all the necessary infrastructure for field supply. Currently, the determination of fuel truck routes is carried out empirically, using the trial-and-error strategy. This strategy can cause a significant increase in the distances traveled by fuel truck, increasing the waiting time for service and, in more extreme cases, the occurrence of interruption of operation of mine equipment due to lack of fuel, directly impacting production. The objective of this work is to characterize the fuel truck routing problem, so that new studies can approach solution methods for the problem.

Keywords: Vehicle routing. Fuel Truck. Combinatorial optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Exemplo fictício do problema de roteamento veículos	18
Figura 02 – Variações básicas do problema roteamento veículos	19
Figura 03 – Ilustração de um comboio de combustível na mina	21
Figura 04 - Ilustração da composição frota de comboios	21
Figura 05 - Frota equipamentos abastecido por comboios	22
Figura 06 - Características dos equipamentos abastecidos por comboios	22
Figura 07 – Gráfico Pareto distribuição horas paradas Aguardando Comboio	24
Figura 08 – Perfil de Perdas Perfuração – Apropriação Aguardando Comboio	25
Figura 09 – Análise de perdas na movimentação de mina Carajás	25

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

DS – Desenvolvimento Sustentável

ITV - Instituto Tecnológico Vale

UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto

GPS – Sistema de Posicionamento Global

N4 e N5 – Divisão de eixos da mina do complexo Carajás

PRV - Problema de Roteamento de Veículo

PRVC – Problema de Roteamento de Veículos Capacitado

PRVCD - Problema de Roteamento de Veículos Capacitados com Restrição de Distância

PRVJT - Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo

PRVFR - Problema de Roteamento de Veículos com Frete de Regresso

PRVCE - Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entregas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivo Geral	16
1.3	Objetivos Específicos	16
1.4	Organização do Trabalho	16
2	ROTEAMENTO DE VEÍCULOS	17
3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	21
4	IMPORTÂNCIA DO PROBLEMA	24
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
	REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

O crescimento do mercado, incentivado pelo surgimento de novas oportunidades e necessidades, vem tornando as empresas cada vez mais competitivas, exigindo mais agilidade, pontualidade e disponibilidade nas operações. Devido ao constante crescimento do mercado global, diversas exigências relacionadas à logística e ao transporte, surgem a todo instante. Redução de custos, programação das entregas, redução e cumprimento dos prazos de entrega e disponibilidade constante dos produtos, são alguns exemplos de problemas logísticos.

Nas indústrias de mineração a situação não é diferente, existem diversos desafios no transporte de material granulado. O complexo Carajás, da Vale S.A, possui extensa região geográfica, subdividindo em dois eixos, N4 e N5. O complexo possui equipamentos de grande porte nas operações de extração mineral. A frota de equipamentos fora de estrada é composta por caminhões, carregadeiras, escavadeiras, tratores e perfuratrizes. Os caminhões fora de estrada realizam o abastecimento em postos de combustível fixos ao longo da mina. Já os demais equipamentos fora de estrada possuem limitação de deslocamento em grandes distâncias, assim, é necessário que sejam reabastecidos nos locais de operação.

O abastecimento nos locais de operação é realizado por meio de comboios de combustível, que são caminhões equipados com um tanque de combustível e infraestrutura necessária para abastecimento, como mangueiras e bombas. Os comboios desempenham o papel de postos de combustíveis móveis.

Um problema de ampla aplicação prática nas indústrias é o problema de roteamento de veículos. De acordo com Arenales et al. (2007), o problema de roteamento de veículos envolve o projeto de rotas de entrega ou coleta com custo mínimo, iniciando de um ou mais depósitos para um número de clientes, submetidas a restrições adicionais. Verificou-se que o problema de roteirização dos comboios de combustível pode ser caracterizado com um problema de roteamento de veículos.

Atualmente, no complexo Carajás, a definição de rotas dos comboios é realizada pela equipe de programação com base na experiência dos colaboradores, utilizando a estratégia tentativa e erro. Portanto, devido à natureza combinatória do problema, sabe-se que nem sempre é possível encontrar boas soluções para instâncias reais utilizando apenas estratégias manuais.

A literatura sobre roteamento de veículos é extensa, porém para a aplicação específica deste estudo de comboios de combustível em áreas de mina não foram encontrados estudos. Assim, a principal contribuição deste trabalho é caracterizar o problema de roteamento de

comboios de combustível no complexo Carajás, para que a sua solução possa ser abordada em trabalhos futuros na literatura.

1.1 Motivação

Apesar da importância econômica e operacional do serviço de abastecimento abordado, a determinação das rotas de operação dos comboios de abastecimento nas unidades operacionais de mineração ainda é realizada de forma empírica, podendo gerar aumento significativo nas distâncias percorridas pelos comboios, elevação do tempo de atendimento e, em casos mais extremos, falta de combustível em equipamentos.

1.2 Objetivo Geral

Caracterizar o problema de roteamento de comboios de combustível no complexo de Carajás da mineradora Vale S.A.

1.3 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica de problemas de roteamento de veículos;
- Caracterizar o problema estudado;
- Descrever a importância prática do problema.

1.4 Organização do Trabalho

Os demais capítulos deste trabalho são apresentados como segue. O Capítulo 2 apresenta a definição do problema de roteamento de veículos. Capítulo 3 reporta a caracterização do problema. Capítulo 4 descreve a importância do problema. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais.

2 ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

A roteirização surgiu a partir do problema do caixeiro viajante, o qual consiste em determinar a melhor rota para um vendedor, de modo que ele saia de um ponto inicial e retorne a ele passando pelos locais necessários. Com o passar do tempo foram adicionadas novas restrições, chegando ao problema de roteirização (CUNHA, 2000).

De acordo com Toth e Vigo (2002), o Problema de Roteamento de Veículos é um problema de otimização combinatória NP-difícil, que consiste na utilização de uma frota de veículos para realizar o serviço de entrega de mercadorias para todo um conjunto de clientes, de forma que seja minimizado o número de veículos usados e a distância total percorrida por eles. Na literatura são encontradas diversas variações do problema, como em coleta de resíduos sólidos, transporte por ônibus escolares, atividades de vendedores, entre outros. (VIGO; TOTH, 2002).

O problema de roteamento de veículos (PRV) é um problema com ampla aplicação prática em logística, pois abrange desde a produção de mercadorias até a entrega aos clientes. Dantzig e Ramser (1959), foram os primeiros a formular o PRV, no qual procuravam resolver um problema real de distribuição de combustível. Desde então, o problema é abordado de diferentes maneiras e diversas metodologias já foram propostas para resolvê-lo. Os trabalhos de Brown e Graves (1981), Fisher et al. (1982), Bell et al. (1983), Evans e Norback (1985) e Golden e Wasil (1987), descrevem aplicações do PRV em indústrias de petróleo, químicas, alimentícias e de bebidas. Desde então, o estudo deste problema gerou grandes desenvolvimentos nos campos de algoritmos exatos e heurísticos. Em particular, algoritmos exatos de programação altamente sofisticados e meta-heurísticas poderosas para o problema de roteamento tem sido proposta (LAPORTE, 2009).

Goldbarg e Luna (2005), destacam que o problema de roteamento de veículos está entre os mais complexos da área de otimização combinatória. Em problemas de grande porte, onde há um número significativo de variáveis, nem sempre é possível ter uma boa solução por meio de métodos exatos. Dada a insuficiência da resposta dos métodos exatos e a alta complexidade, tem sido usados procedimentos aproximativos. Esta é uma boa alternativa quando é preciso encontrar soluções boas em um tempo limitado (GOLDBARG et al., 2015; VIEIRA, 2013).

Laporte (1992), define o Problema de Roteamento de Veículos como o problema de planejar a entrega ou conjunto de rotas ótima. As rotas são compostas por veículos que devem partir de um ou vários depósitos para um determinado número de clientes espalhados em

diversas localizações geográficas, sujeitos a um conjunto de restrições. O autor apresenta uma visão geral das diversas abordagens utilizadas para solucioná-lo, desdobrando-o em algoritmos exatos, que encontram a solução ótima para o problema, e algoritmos heurísticos, que buscam uma boa solução viável rapidamente, mas que não é necessariamente a solução ótima.

Para facilitar o entendimento do problema de roteamento de veículos, apresenta-se a seguir um exemplo fictício com um depósito de coleta de materiais, três caminhões para entrega e 12 clientes, conforme Figura 1. Observa-se que o Caminhão 1 irá visitar os clientes 7, 1, 4 e 3, nesta ordem. Já o Caminhão 2 irá visitar os clientes 9, 6, 2 e 5, nesta ordem. Por fim, o Caminhão 3 irá visitar os clientes 12, 10, 11 e 8, nesta ordem. Ao final da rota, cada caminhão retorna para o depósito.

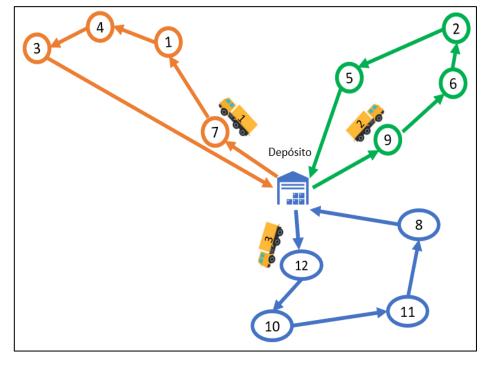


Figura 01 – Exemplo fictício do problema de roteamento veículos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, o problema de roteamento de veículos pode ser classificado em diversas variações de acordo com as suas características. Algumas destas variações são ilustradas na Figura 2.

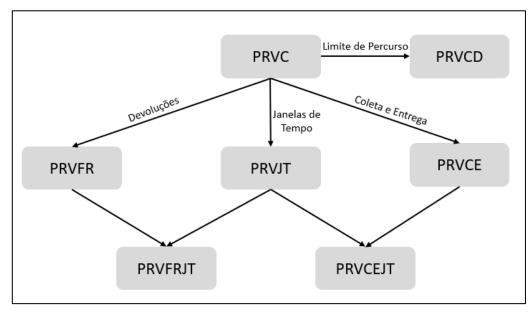


Figura 02 – Variações básicas do problema roteamento veículos

Fonte: Adaptado de VIGO; TOTH (2022).

A seguir, apresenta-se um breve descritivo destas variações do problema:

- Problema de roteamento de veículos capacitado (PRVC): Tem por objetivo identificar um conjunto de rotas tais que, cada cliente seja visitado por um veículo e a soma das demandas dos vértices de uma rota não ultrapasse a capacidade do veículo escolhido.
- Problema de roteamento de veículos com restrição de distância (PRVCD): Tem por objetivo identificar um conjunto de rotas tais que o tamanho de cada circuito não pode exceder o valor estipulado como distância máxima.
- Problema de roteamento de veículos com janelas de tempo (PRVJT): É adicionado um intervalo de janela de tempo. Além de todas as restrições do PRVC, nesta variação os veículos devem iniciar dentro da janela de tempo estabelecida e permanecer em cada cliente com uma quantidade de tempo representando o atendimento. É uma extensão do PRVC e caso algum veículo chegue antes do que estava previsto, ele fica aguardando até que se inicie a janela de tempo
- Problema de Roteamento de Veículos com Frete de Regresso (PRVFR): É preciso obedecer a uma ordem de precedência e primeiro deve ser realizada a entrega antes da coleta. É uma extensão do PRVC que além das restrições de capacidade, é dividido em dois subconjuntos, quantidade de clientes que possuem uma demanda de recebimento

de algum produto e outro subconjunto é formado por clientes que possuem uma quantia de produtos que precisam ser coletados. A principal restrição dessa variação acontece quando uma rota passa pelos dois subconjuntos.

 Problema de roteamento de veículos com coleta e entrega (PRVCE): Trata-se de outra extensão do PRVC e nela cada cliente possui duas quantidades, representando a demanda de mercadorias que devem ser entregues e coletadas, nessa ordem.

Além das variações exemplificadas, na literatura podem ser encontradas outras variações do problema de roteamento. Como exemplo, variações que são junções de duas ou mais outras que foram sendo identificadas com o tempo. Conforme Golden, Raghavan e Wasil (2008), nos últimos anos surgiram outras variantes devido a inúmeras evoluções tecnológicas.

A literatura sobre problemas de roteamento de veículos pode ser encontrada em livros clássicos, como *Vehicle Routing Problem* de Toth e Vigo (2014), e *The Vehice RoutingProblem: Latest Advances and New Challenges* de Bruce L. Golden, S. Raghavan, Edward A. Wasil (2008), além de diversos artigos em periódicos e anais de conferências.

3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O comboio de abastecimento é uma unidade móvel que desempenha a função de abastecimento em campo. Ele possui os recursos necessários para execução da atividade frente aos equipamentos que apresentam dificuldades de locomoção. Na Figura 3, ilustra-se um comboio de combustível na fase mina. O atendimento aos equipamentos móveis é realizado na própria frente de trabalho, caracterizando o mesmo como posto de combustível móvel.

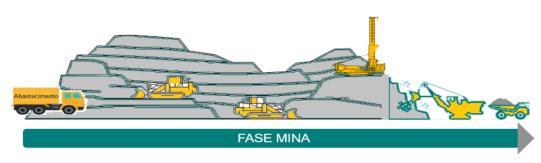


Figura 03 – Ilustração de um comboio de combustível na mina

Fonte: Elaborado pelo autor.

Atualmente, a frota de comboios de combustível no complexo Carajás é composta por nove caminhões, sendo estes subdivididos em seis com capacidade de 30.000 litros e três com a capacidade de 20.000 litros de diesel, conforme ilustrado na Figura 4. Em média, cada comboio realiza 35 atendimentos por dia, totalizando um volume médio de diesel abastecido de 150.000 litros/dia.

Frota Combolo
Abastecimento

9 ativos

Capacidade transporte
30.000 litros Diesel

Capacidade transporte
20.000 litros Diesel

6 ativos

3 ativos

Figura 04 – Ilustração da composição frota de comboios

Fonte: Elaborado pelo autor.

A frota de equipamentos de mina abastecidos por comboios é composta por 199 ativos, sendo estes divididos no processo de carga, perfuração, infraestrutura e apoio, conforme ilustrado na Figura 5.

Frota de
Equipamentos
(Consumidores)

199 ativos

Perfuração e
Desmonte

16 ativos

19 ativos

Figura 05- Equipamentos de minas abastecidos por comboios

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para facilitar a organização da frota de equipamentos abastecidos por comboios foram criados subgrupos por modelo, total de equipamentos, consumo (litros por hora), capacidade do tanque (litros), participação no processo produtivo e classificação quanto móvel ou semimóvel conforme Figura 06.

Figura 06- Características dos equipamentos abastecidos por comboios

Frota Geral	Subgrupos / Modelo	N° de Equipame ntos	Consumo I/ht	Capacidade do Tanque	Processo produtivo	Classificação
CARREGADEIRAS GP	L2350	12	411,7	4940	Carga	Móvel
CARREGADEIRAS GP	L1850	2	331,3	3975	Carga	Móvel
ESCAVADEIRAS GP	PC2000	2	283,3	3400	Carga	Semimóvel
CARREGADEIRAS PP	980H / 980M	12	39,9	479	Infra e Apoio	Móvel
CARREGADEIRAS PP	988H	21	59,3	712	Infra e Apoio	Móvel
CARREGADEIRAS PP	962 G/H	11	28,4	341	Infra e Apoio	Móvel
PERFURATRIZ PP	ROC D7	1	30,8	370	Perfuração e Desmonte	Semimóvel
PERFURATRIZ PP	D65/ FLEX	3	90	1080	Perfuração e Desmonte	Semimóvel
PERFURATRIZ GP	MD6290	2	166,7	2000	Perfuração e Desmonte	Semimóvel
PERFURATRIZ GP	DML/PV275	11	105,8	1270	Perfuração e Desmonte	Semimóvel
PERFURATRIZ GP	MD6420	2	268,1	3217	Perfuração e Desmonte	Semimóvel
MOTONIVELADORA PP	16M /16H	4	41	492	Infra e Apoio	Móvel
MOTONIVELADORA GP	24M	15	110,5	1326	Infra e Apoio	Móvel
MOTONIVELADORA PP	140M	1	34,7	416	Infra e Apoio	Móvel
RETROESCAVADEIRA	345 / 349	18	58,8	705	Infra e Apoio	Semimóvel
RETRO (ESCORPIAO)	416E	4	12	144	Infra e Apoio	Móvel
RETROESCAVADEIRA	323D	11	34,2	410	Infra e Apoio	Semimóvel
RETROESCAVADEIRA	336D / 349DL	8	51,7	620	Infra e Apoio	Semimóvel
TRATOR DE ESTEIRAS GP	D11R/T	32	134,1	1609	Infra e Apoio	Semimóvel
TRATOR DE ESTEIRAS GP	D9R/T	13	74,1	889	Infra e Apoio	Semimóvel
TRATOR DE ESTEIRAS PP	D6T	6	35,3	424	Infra e Apoio	Semimóvel
TRATOR DE PNEU GP	854K	8	130,2	1562	Infra e Apoio	Móvel

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os comboios operam em turnos interruptos e o processo de abastecimento dos equipamentos de mina são realizados baseados na medição de combustível dos equipamentos em operação, no consumo dos equipamentos e nas solicitações realizadas por rádio pelos operadores. A partir destas informações, a central de abastecimento realiza a roteirização dos comboios no turno. Esta roteirização é realizada de maneira empírica, baseado na experiência do programador.

Portanto, o problema de roteamento de comboios é um problema de roteamento de veículos capacitado com janelas de tempo. Ele é capacitado uma vez que cada comboio possui uma capacidade de diesel a ser transportado. Já as janelas de tempo se devem à janela que deve ser respeitada para que os equipamentos em operação não tenham pane seca por falta de combustível.

4 IMPORTÂNCIA DO PROBLEMA

Para demonstrar a importância prática do problema de roteamento de comboios de combustível, apresenta-se neste capítulo alguns cenários reais coletados no complexo Carajás.

Por meio do levantamento do perfil de perdas operacional do período de janeiro a abril de 2022 foi possível identificar que com a metodologia aplicada atualmente e os controles existentes estão ocorrendo paradas dos ativos por meio do status de "aguardando comboio". Ocorreram aproximadamente 1.395 horas paradas no período analisado. Esta apropriação se dá aos equipamentos que necessitam de abastecimento e, por conta de problemas nas rotas dos comboios, precisam ficar aguardando o reabastecimento.

Conforme indicado no gráfico de Pareto da Figura 07, as frotas que possuem maiores impactos são as de perfuratrizes e tratores de esteira, que representam aproximadamente 71,9% das perdas em relação à frota geral complexo Carajás.

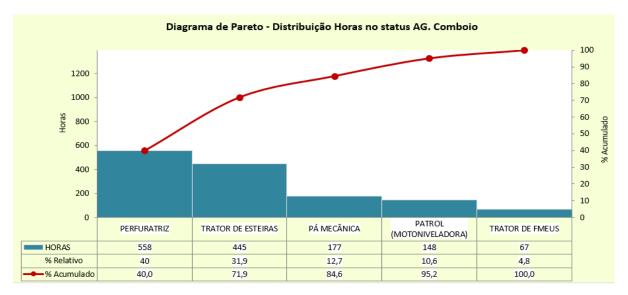


Figura 07- Gráfico pareto distribuição horas paradas aguardando Comboio

Fonte: Acervo interno Vale.

A frota de perfuratrizes foi selecionada para entendimento da parcela de perda na produção, conforme Figura 7. Pode-se observar na Figura 8 que para o período analisado houve uma perda de aproximadamente 2,09% na utilização física dos equipamentos.

Perfil de perdas - Frota de perfuração PERDAS TOTAL META AUT META CONV. AG PLANEJ DEMANDA MAT DESG TROCA HASTE 0,29% TROCA DE TURNO 1.53% MAT DESG TROCA HA. AG COMBOIO AG ACERTO DE PRACA 3.00% 1.63% AG EMBARCACAO EM CARRETA TRANSPORTE EM CAR. 1,85% 1,84% HI TOTAL FALTA DE OPERADOR AG DETONACAO 1.44% 2,00% 1,95% REFEICAO 0.36% 1.85% 0,84% 31,05% 0,79% 0,62%

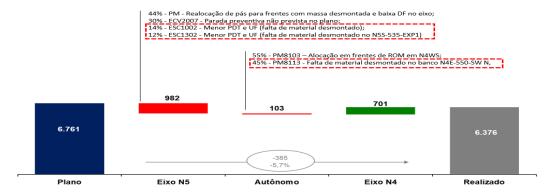
Figura 08- Apropriação aguardando Comboio

Fonte: Acervo interno Vale.

As perfuratrizes possuem grande importância no processo produtivo, uma vez que tratam do início da cadeia produtiva na fase mina. Na Figura 9 é exemplificado a perda na movimentação devido à falta de material desmontado e, parte desta perda está ligada ao processo de perfuração. Portanto, processo que também é impactado pelo reabastecimento de perfuratrizes.

Figura 09- Análise de perdas na movimentação de mina Carajás

Movimentação Total (kt)



Fonte: Acervo interno Vale.

Frente aos problemas identificados no processo de definição do roteamento de comboios no complexo de Carajás faz-se necessário o estudo de métodos de otimização para a solução do problema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho foi caracterizar o problema de roteamento dos comboios de combustível no Complexo de Carajás.

Para tal, realizou-se a definição de três objetivos específicos para auxiliar no alcance do objetivo geral, sendo que o primeiro foi realizar a revisão bibliográfica de problemas de roteamento de veículos, sendo demonstrado um exemplo fictício da definição de rota e as possíveis variações existentes na definição desta frente da pesquisa. O segundo foi caracterizar o problema estudado, apresentado a frota de comboios, os equipamentos de operação a serem reabastecidos em campo, demais especificidades do problema e a roteirização realizada atualmente de maneira manual pelos programadores. Por fim, no terceiro objetivo específico, descreve-se a importância prática do problema, comprovando desta forma as perdas no processo produtivo devido às paradas das perfuratrizes por falta de combustível.

Recentemente, em Souza et al. (2022), foi proposto um modelo exato para tratar uma versão simplificada do problema. Como sugestão de trabalhos futuros pretende-se explorar novos métodos exatos e heurísticos para a resolução do problema caracterizado neste estudo.

REFERÊNCIAS

- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia**. [S.l.: s.n.], 2007. ISSN 16130073.
- CUNHA, C. B. Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. **Revista Transportes da ANPET Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes.** São Paulo, v.8, n.2, p.51-74, 2000.
- DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. **The truck dispatching problem.** Management Science, v. 6, 1959. ISSN 0025-1909.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear:** modelos e algoritmos. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.
- GOLDBARG, E., GOLDBARG, M. C. e Luna, H. P. L. Otimização Combinatória e Metaheurísticas: Algoritmos e Aplicações, Rio de Janeiro: Campus, 2015. 416 p.
- GOLDEN, B.; RAGHAVAN, S.; WASIL, E. **The Vehicle Routing Problem:** Latest Advances and New Challenges. Wasil Springer Science & Business Media, 20 de jul. de 2008 591 páginas.
- GOLDEN, Bruce; RAGHAVAN, S.; WASIL, Edward. EDS. 2008. **The Vehicle Routing Problem:** Latest Advances and New Challen**ges**. Springer, New York. 589 pp.169.
- LAPORTE, G. (1992) The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms. **European Journal of Operational Research**, 59, 345-358. http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C
- LAPORTE, G. Fifty Years of Vehicle Routing. **Transportation Science**, v. 43, n. 4, p. 408-416, 2009.
- $\label{eq:total_condition} TOTH, \ P. \ and \ VIGO, \ D. \ (2002) \ \ \textbf{The} \ \ \textbf{Vehicle} \ \ \textbf{Routing} \ \ \textbf{Problem}. \ \ Siam, \ Philadelphia. \\ \ http://dx.doi.org/10.1137/1.9780898718515.$
- SOUZA, R. P.; COUTINHO, N. S.; COTA, L. P.; RODRIGUES, L. C. A. Roteamento de comboios de combustível para abastecimento de equipamentos de mina em campo: Um estudo de caso. Disponível em https://www.sba.org.br/cba2022/wp-content/uploads/artigos_cba2022/paper_1800.pdf Acesso em: 17 de novembro de 2022., 2022.
- VIEIRA, H. P. Metheuristica para a solução de problemas de roteamento de veículos com janela de tempo. Dissertação de Mestrado em Matemática Aplicada Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica UNICAMP, Campinas, 2013.