

## UM FRAMEWORK DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE TRENS EM MALHAS FERROVIÁRIAS.

Danilo Freitas Vieira, André Luiz Feijó dos Santos  
Orientador: Prof. André Gustavo dos Santos  
Departamento de Informática  
ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura

### Introdução

O minério de ferro representa cerca de 59% da produção mineral brasileira, com mais de 378 milhões de toneladas extraídas em 2023 e um faturamento setorial em torno de R\$ 248 bilhões. Esses números evidenciam como ganhos mesmo modestos em eficiência logística podem gerar impactos econômicos imediatos. Entre minas e portos, trens percorrem malhas ferroviárias extensas e complexas, sujeitas a interdições, restrições de velocidade e paradas programadas, que resultam em conflitos de ocupação e atrasos em cascata. Para enfrentar esse desafio, este trabalho apresenta um framework, baseado em uma solução existente da BITKA Analytics, que representa a malha ferroviária como grafo e integra programação linear inteira mista (MILP) com módulos de geração de instâncias sintéticas e visualização de soluções. A proposta busca mitigar conflitos, reduzir atrasos e aumentar o aproveitamento da capacidade ferroviária, traduzindo eficiência operacional em ganhos concretos para o setor.

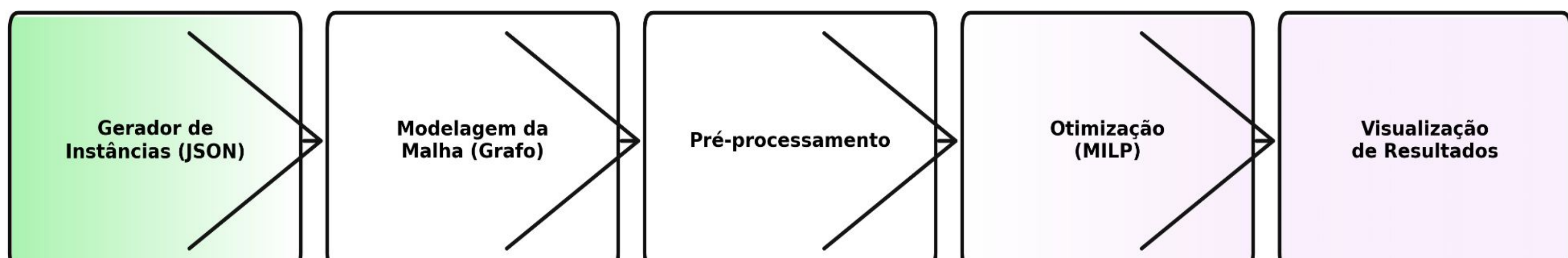
### Objetivos

- Desenvolver e avaliar um framework de otimização para o problema de coordenação e roteamento de trens em malhas ferroviárias, considerando restrições operacionais, interdições e paradas programadas, com foco na redução de atrasos e conflitos de ocupação de trechos.
- Formular um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP) para o problema.
- Criar um gerador de instâncias sintéticas para avaliação em cenários controlados.
- Desenvolver ferramentas de visualização de soluções, facilitando a análise dos resultados.

### Material e Métodos ou Metodologia

O trabalho foi desenvolvido a partir de um pipeline estruturado, utilizando a linguagem Python:

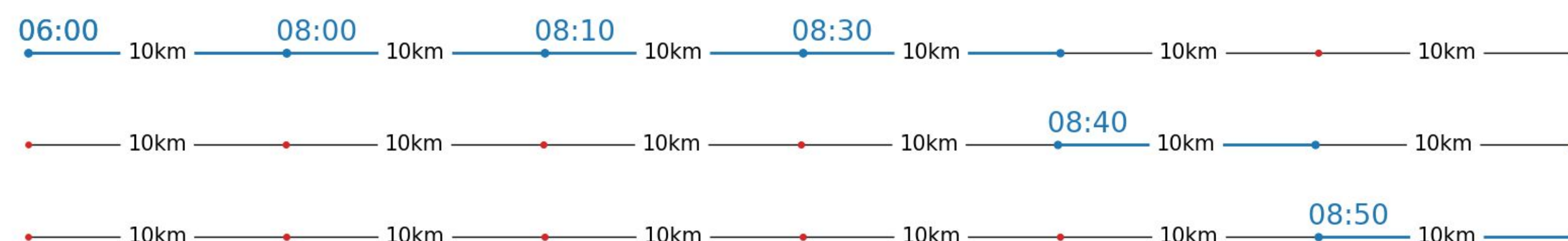
- Gerador de Instâncias** – criação de cenários sintéticos em formato JSON.
- Modelagem da Malha** – representação da rede ferroviária como grafo dirigido.
- Pré-processamento** – cálculo de tempos mínimos de entrada dos trens em cada trecho e poda de rotas inviáveis.
- Otimização (MILP)** – formulação matemática resolvida com o solver Gurobi.
- Visualização de Resultados** – reconstrução das rotas obtidas com marcação temporal de entrada para cada trem em cada circuito da via.



### Apoio Financeiro

### Resultados e/ou Ações Desenvolvidas

Foram geradas instâncias sintéticas em diferentes configurações de linhas, pátios e eventos temporais, processadas pelo framework proposto. O modelo foi capaz de reconstruir trajetórias completas de trens, com registro dos tempos de entrada e saída em cada circuito de via (CDV), demonstrando consistência na propagação de restrições. Em cenários com interdição total de segmento, observou-se o atraso forçado da partida até a liberação do trecho; em restrições de velocidade, os tempos de trânsito foram ajustados de forma proporcional ao limite imposto. As visualizações gráficas das soluções evidenciaram os efeitos locais dessas restrições e confirmaram a coerência das rotas obtidas. A figura abaixo ilustra uma solução encontrada pelo framework proposto:



### Conclusões

O projeto consolidou a etapa inicial de construção de um framework voltado ao problema de roteamento de trens em malhas ferroviárias, estabelecendo fundamentos metodológicos e computacionais para a representação da malha, o tratamento de restrições operacionais e a aplicação de métodos de otimização. Essa fase resultou em uma base estruturada que possibilita a evolução para cenários mais complexos e realistas. O pipeline ainda não foi testado em situações realistas, contudo o sistema mostrou-se funcional e apto a sustentar análises mais amplas em etapas futuras. Portanto, os próximos passos envolvem o aprimoramento e implementação das heurísticas, a calibração de parâmetros com dados provenientes de operações reais e a realização de experimentos comparativos em escala, em continuidade à parceria entre o Departamento de Informática da UFV (DPI) e a BITKA Analytics.

### Bibliografia

- IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Panorama da Mineração Brasileira 2024. Brasília: IBRAM, 2024. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/09/PMB2024.pdf>
- GUROBI OPTIMIZATION, LLC. Gurobi Optimizer Reference Manual. 2025. Disponível em: <https://www.gurobi.com>
- AMUTHAN, A.; THILAK, K. D. Survey on tabu search meta-heuristic optimization. In: International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), 2016.